

•生物编目•

生物多样性信息资源. II. 环境类型数据

张凤麟^{1,2} 王 昕^{1,2} 张 健^{1,2*}

1 (华东师范大学生态与环境科学学院, 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 上海 200241)

2 (上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 环境类型数据是研究生物多样性分布格局、多样性形成与维持机制、物种保育等很多重要生态学问题的基础。近年来, 随着环境监测网络在全球范围内的不断扩张与新监测手段的不断涌现, 区域和全球尺度上的不同类型的环境数据呈爆炸式增长。然而, 这些海量的数据零散地分布在互联网的各个角落, 给生物多样性研究人员了解数据信息、高效选择和利用数据等带来了挑战。面对环境数据来源广、分布零散的现状, 本文从气候、地形地貌土壤与生境异质性、土地覆盖、水文和其他等5个方面对环境数据进行整理, 并且选取其中一些使用频率较高的数据集, 从它们的数据来源、数据结构、数据获取方式、数据精度以及数据使用情况等方面举例介绍。本文共介绍了45个不同类型的数据集, 既包括WorldClim气候数据、HWSD (Harmonized World Soil Database)土壤数据等在生态学中频繁使用的数据集, 也包括气候变化速率、EarthEnv生境异质性数据、全球森林覆盖数据、全球光污染数据等最新发布或较少使用的数据集。另外, 需要指出的是, 这些数据集远不能涵盖目前所能获得并在持续增加的环境类型数据。作者希望本文的不完整总结能够为研究人员高效选择和有效利用这些和其它相似的环境数据提供参考。

关键词: 生物多样性信息学; 生物地理学; 宏生态学; 大数据; 数据共享

Biodiversity information resources. II. Environmental data

Fenglin Zhang^{1,2}, Xin Wang^{1,2}, Jian Zhang^{1,2*}

1 Tiantong National Station for Forest Ecosystem Research, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241

2 Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092

Abstract: Environmental data are the basis for addressing many important ecological issues, including biodiversity distribution patterns, mechanisms of biodiversity formation and maintenance, and species conservation. Recently, many types of environment data at regional and global scales have dramatically increased, with the continuous expansion of global environment monitoring networks and emergence of new monitoring technologies. However, the vast amounts of data are scattered all around the world, making it much more difficult for biodiversity researchers to access detailed information and use these data efficiently. In this paper, we combine the main sources of environmental datasets, and classify them into five major groups, including (1) climate, (2) topography, soil and habitat heterogeneity, (3) land cover, (4) hydrology variables, and (5) other data sets. We then select several datasets with high-frequency usage to briefly introduce the data source, data structure, data availability, and data quality. We also select several previous studies to showcase the use of these datasets. In summary, we include 45 environmental data sets in this paper, covering several frequently used data in ecology (e.g., WorldClim and Harmonized World Soil Database), as well as some latest released or seldom used data (e.g., climate change velocity, EarthEnv habitat heterogeneity data, global forest coverage data, and global light pollution data). In addition, it is important to point out that these data sets are only a small fraction of currently available and continuously increasing environmental data. Overall, we hope that the incomplete list of environmental data can provide guidelines for researchers to select and utilize them

收稿日期: 2017-06-25; 接受日期: 2018-01-05

基金项目: 中组部千人计划青年人才项目和国家自然科学基金(31670439)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jzhang@des.ecnu.edu.cn

and other similar data accurately and effectively.

Key Words: biodiversity informatics; biogeography; macroecology; big data; data sharing

生物群落与其存在的环境是一个不可分割的整体,它们之间的相互作用形成了地球上多种多样的生态系统。环境既是生物群落形成的要素,也是生物群落存在的条件(宋永昌, 2017)。环境要素不仅对各个物种的空间分布格局、时空动态变化等存在着影响,其相关数据也被广泛地用于生物多样性的起源、进化和维持等问题的研究中。在生物多样性研究领域,环境数据往往被作为背景值,研究人员通过分析生物多样性变化与环境变化之间的联系,对现有物种的分布格局作出解释,同时对未来的变化进行预测。因此,各类环境数据的收集、存储和使用显得尤为重要。

近年来,随着环境监测网络在全球范围内的不断完善和新监测手段(如高分辨率遥感、无线传感器网络等)的不断涌现(Turner, 2014),能够获得的环境数据越来越多。然而,在数据的选择、获取和高效利用等方面仍旧存在很多问题。一方面,很多研究人员对这些数据所包含的信息、数据结构、数据获取方式、数据处理方法等了解有限,限制了他们对这些数据集的使用;另一方面,不同层次、不同类型的环境数据零散地分布在互联网的各个角落,给研究人员的获取和使用增加了困难(张健, 2017)。如何最大效率地利用可以获得的环境数据来解决错综复杂的生态学问题,是信息化时代带给生态学家的一大困惑。

本文对环境要素相关的一些主要数据集进行了整理,分别从气候、地形地貌土壤与生境异质性、土地覆盖、水文和其他数据集5个方面予以介绍,并选取了一些使用较为广泛的数据集作为范例,介绍它们的数据结构、数据获取方式、数据处理方法等,同时列举了部分使用这些数据集的研究案例,以期能为研究人员高效利用这些环境数据提供参考。

1 主要气候数据集

气候因子是群落构建中不可或缺的环境变量,温度和降水是影响物种分布的两个重要因素(Whittaker, 1975),温度和降水在不同尺度上的时空格局变化使得生物有机体的性状、分布格局和种间

关系发生改变,造就了不同区域、不同纬度、不同海拔上的生物多样性差异,进而对生态系统功能和稳定性造成影响(Whittaker, 1975)。本部分选取了4个不同类型的气候数据集进行介绍。

1.1 WorldClim

WorldClim (<http://www.worldclim.org>)是2005年由美国加州大学伯克利分校的Robert Hijmans、Susane Cameron等基于ANUSPILIN插值法,整合了大量国家和区域尺度的气象数据建立起来的全球气候数据集(Hijmans et al, 2005)。该数据集目前已成为生态学领域应用较广的气候数据集之一。WorldClim v1.4中包括1960–1990年间每月均温、最低温、最高温、降水量等19个生物因子的变化数据(附录1),该版本同时提供基于古气候数据对全新世中期(约6,000年前)和末次盛冰期(约22,000年前)的气候重建数据,以及基于IPCC未来气候变化模型对2041–2060年和2061–2080年两个时期的气候预测数据。近期更新的WorldClim v2.0在之前版本的基础上添加了1970–2000年间太阳辐射、风速和气压等信息(Fick & Hijmans, 2017)。WorldClim提供从30 arc-second (~1 km)到10 arc-minute (~20 km) 4种空间分辨率的数据。

基于ISI Web of Science对Hijmans等(2005)有关WorldClim数据集的文章的引用情况统计,截至2017年11月,WorldClim数据集已被使用7,981次(图1),研究领域涉及生态学、保护生物学、地理学和气象学等。在生物多样性研究中,WorldClim的应用也很广泛。例如,Warren等(2008)使用WorldClim的19个生物气候因子和墨西哥几种生物姊妹种的空间分布等数据检验了生态位保守性假说,发现物种间的环境生态位重叠更多地受到地理重叠的影响,而与谱系距离相关性较小。Weigelt等(2013, 2016)通过WorldClim获得了全球岛屿的气候及降水数据,分析了第四纪末期的气候变化对岛屿生物多样性的影响。

1.2 Wang和Hamann的区域气候数据

加拿大英属哥伦比亚大学的Tongli Wang和阿尔伯塔大学的Andreas Hamann等提出了通过空间

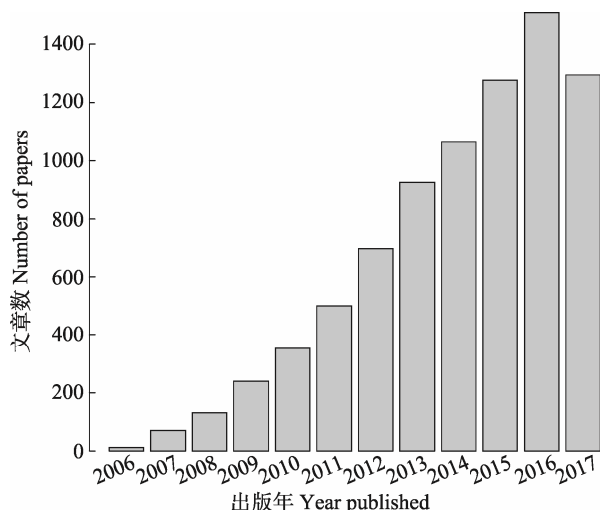


图1 基于WorldClim的数据在2006年至2017年11月之间发表的论文统计(数据来源: ISI Web of Science)

Fig. 1 The numbers of papers published between 2006 and November 2017 using the WorldClim data (Data source: ISI Web of Science)

插值技术和高程修正生成无尺度高分辨率气候数据的新方法, 并计算了包括有效积温、无霜期和干旱指数等在内的50余个生物相关气候变量 (Wang et al, 2006)。该方法极大地提高了区域尺度上气候数据的精度, 已被广泛地应用到北美、南美、欧洲和亚太平洋等地区的研究。为方便研究人员的使用, 作者开发了一系列独立软件, 目前, 该系列软件包括: 北美洲ClimateNA (<http://tinyurl.com/ClimateNA>)、南美洲ClimateSA (<http://tinyurl.com/ClimateSA>)、欧洲ClimateEU (<http://tinyurl.com/ClimateEU>) 和亚太平洋地区ClimateAP (<http://asiapacific.forestry.ubc.ca/research-approaches/climate-modeling/>)。只需输入查询点的经纬度、海拔以及时间范围信息即可获得相关的气候数据, 数据可以直接以CSV的格式保存(图2)。

Wang等(2006)所建立的计算气候数据的新方法及其系列工具已逐渐被生态学家们所关注, 并应用在了物种分布、生态系统动态等研究中。例如, Stralberg等(2015)使用ClimateNA获取了122,202个北美鸟类观测站点的气候数据, 分析了环境因素对鸟类分布的影响。Zhang等(2015)从该数据集中获得了1958–2009年间加拿大西部1,680个森林固定样地的年降水量和年均温等气候数据, 用于分析树木竞争和气候变化对北方森林动态的影响。Yeaman等(2016)使用ClimateNA气候数据研究了不同针叶树

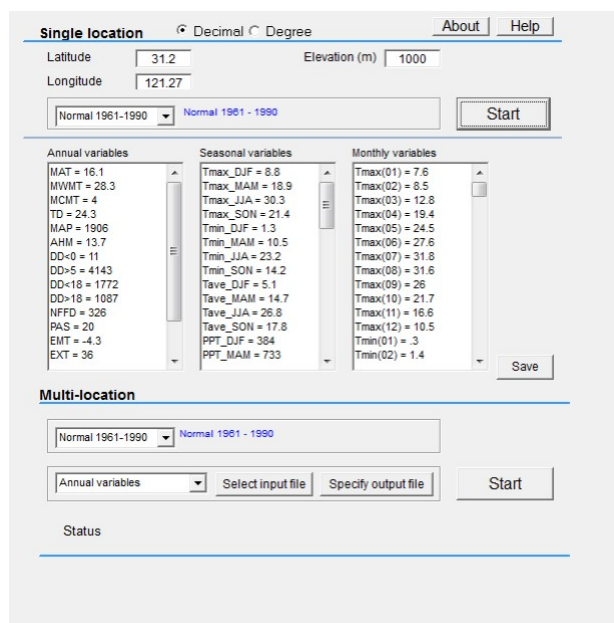


图2 ClimateAP软件界面

Fig. 2 ClimateAP software interface

种在气候变化条件下演化产生相似表型的机制, 分析了各树种的基因变异与温度变化之间的联系。

1.3 全球历史气候网络数据(GHCN)

全球历史气候网络数据(Global Historical Climatology Network, GHCN)是一个地面气象站点综合数据集 (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/land-based-station-data/land-based-datasets/global-historical-climatology-network-ghcn>), 主要包含 Daily 和 Monthly 两个子数据集。GHCN-Daily整合了全球180多个国家和地区的100,000多个地面气象站点(包括228个中国气象站点)的每日天气记录数据。数据集提供最高温、最低温、降水量、降雪量和积雪深度等每日天气变量数据, 但每个站点的数据在记录时长和周期上差异很大(Menne et al, 2012)。GHCN-Daily每周末都会对数据进行更新, 并在数据公布的45–60天后, 将数据归档至源数据页面。

由于GHCN数据具有时间分辨率高的优势, 已被应用到气候变化规律、物种对极端气候事件的响应和物候变化等研究中。例如, Marino等(2011)利用GHCN中的309个站点的每日最高温、最低温数据, 分析了美国1901–2007年间的气候变化情况, 对未来春季植物受冻伤的可能性进行了预测。Chen和Yang (2014)等利用GHCN数据对中国近年来的异常气候现象进行分析, 对国内大部分地区遭受严重热

浪袭击的内在机制进行了研究。Cavanaugh和Shen (2014)使用了GHCN北半球4,000个站点的地表温度数据,对1995–2010年间整个北半球的气候变化及其趋势进行了分析和预测。

1.4 气候变化速率(climate velocity)数据

气候的变化影响着动植物的生活范围,其变化的速率对生物的生存具有重要的意义。气候变化速率是Loarie等(2009)根据温度的空间变化梯度和模型预测的未来温度变化情况相结合($^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}=\text{km}\cdot\text{yr}^{-1}$)而推导出的。与传统的最高温、最低温等气候指标相比,气候变化速率是一个矢量,对生物多样性的影响取决于种群的迁移速度及迁移方向是否能与气候变化同步。在气候变化的条件下,具有高迁移速度的种群更容易生存在适宜的气候环境中。在Loarie等(2009)的工作基础上,气候变化速率的分析已经应用于预测各个物种如何响应未来的气候变化(Dobrowski et al, 2013; Burrows et al, 2014)、分析潜在的物种庇护所和生物多样性热点区域(Carroll et al, 2015; Chen et al, 2017)的研究中,为保护区设计与管理、物种保护等提供了重要的参考(Ackerly et al, 2010)。同样,气候变化速率的分析也可以应用到比较当前和历史气候的变化规律中。例如, Sandel等(2011)使用第四纪末期和当前的年均温、年降雨量和季节性温度变化及降水变化数据计算了历史气候变化速率(<https://datadryad.org/resource/doi:10.5061/dryad.b13j1>),用于解释全球特有物种当前的空间分布格局。

气候变化速率的概念在海洋生态系统研究中也受到关注。基于海洋气候数据集HadISST (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature Data Set; <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>)的海洋冰川和海洋表面的温度数据, Burrows等(2014)和Sunday等(2015)计算了海洋气候变化速率,用于分析人类活动导致的气候变化对海洋生物多样性的影响。

2 地形地貌与土壤、生境异质性数据集

除气候因子外,地形地貌、土壤、生境结构等对物种的分布与扩散、物种组成、群落结构等也有重要的影响,这些环境因子通过对气候的调节或地理隔离等来直接或间接地影响物种的分布。地形地貌与土壤作为动植物生长的基础,其异质性极大地

影响着物种的分布及其动态变化。不同类型的环境组合导致了不同程度的生境异质性,进而形成了不同区域在生物多样性上的变异(Kerr & Packer, 1997)。本部分选取海拔、土壤和生境异质性三方面的数据集,对相关工作进行简要介绍。

2.1 地形地貌数据

在地形地貌变量中,海拔频繁地被生态学家用于全球和区域生物多样性格局与动态的解释。目前常用的海拔数据大多来自于航天飞机雷达地形测绘使命(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)对地球进行的遥感测量,通过处理卫星所获得的影像数据而得到全球数字高程模型(digital elevation model, DEM)系列产品。SRTM数据(<https://dds.cr.usgs.gov/srtm/>)覆盖范围从60° S到60° N,约占全球陆地面积的80%。目前SRTM系列数据的最新版本为CGIAR-CSI SRTM v4.1 (Jarvis et al, 2008),数据空间分辨率为30 m。自2003年公开发布以来,该数据集已在诸多领域广泛应用。例如, Razafindrajao等(2017)使用SRTM高程数据对马达加斯加地区雁鸭科的物种保育状况进行了评估。Szabolcs等(2017)采用SRTM数据分析了阿尔巴尼亚地区两栖动物的多样性分布。另外,需要指出的是, SRTM数据在质量和精度上还存在着一些不足之处,包括森林覆盖区和建筑物密集区的数值普遍偏高(郭庆华等, 2016)以及在山地及峡谷地带常有数据空缺或空白区等问题。针对这些问题,国内外的研究者们不断地对SRTM数据进行修正。例如, Su和Guo (2014)利用机载激光雷达数据分析了不同植被类型对DEM的影响,建立了一种新的方法,对SRTM数据在高程上的误差进行校正。Yue等(2012)选取了中国9个实验区进行研究,采用了HASM (High Accuracy Surface Modelling)曲面建模的方法,对SRTM在山地和峡谷等空缺或空白区的数据进行了补充。除海拔外,坡度、坡向等也影响着动植物的分布,在区域或全球尺度的研究中,通常基于SRTM高程数据来计算相应的坡度、坡向(黄明等, 2013)和土壤湿度(Nolan & Fatland, 2013)等。

由于SRTM当前版本的覆盖范围不包括60° N和60° S以外的区域, Robinson等(2014)通过整合CGIAR-CSI SRTM、ASTER GDEM和GLSDEM三个产品的高程数据,建立了一套覆盖全球91%的陆地表面的数据集EarthEnv-DEM90 (<http://www.earthen>

v.org/DEM), 其数据空间分辨率为90 m。由于弥补了SRTM数据在数据精度和连续性上的不足, 该数据集获得了不少关注。Barton等(2017)选取了该数据集中有关西地中海区域的数据, 结合相关的人类活动信息, 分析了末次冰期以来人类活动与景观变化之间的关系。Borrelli等(2013)在评估和预测全球土地利用变化对土壤侵蚀的影响中使用了该数据中的高程数据。

2.2 土壤数据

由联合国粮农组织建立的土壤数据集 Harmonized World Soil Database (HWSD, <http://web-archive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>)拥有全球范围内16,000多个土壤调查点的数据, 其空间分辨率为30 arc-second (Nachtergaele et al, 2012)。该数据集已被应用到生物量动态变化(Poorter et al, 2016)、生物多样性与生态系统功能关系(Poorter et al, 2015)、物种分布预测(van Andel et al, 2015)、生态水文学(Stisen & Tumbo, 2015)等大尺度范围的研究工作中。

鉴于HWSD数据的分辨率较粗, 难以满足一些研究的需要, Hengl等(2017)在HWSD数据的基础上改进算法, 将数据的空间分辨率提高到了250 m, 建立了一个全球连续的土壤数据集 SoilGrids (<https://www.soilgrids.org/>)。该数据集将土壤属性分为9类, 包括土壤有机碳含量、土壤堆积密度和pH

等。除土壤数据外, SoilGrids还汇总了基于MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)遥感数据所计算的每月日间、夜间的地表平均温度以及WorldClim的每月降水数据。该数据集的全部数据可以通过在网站地图上进行选点或输入所需的经纬度坐标直接下载使用。Moulatlet等(2017)在研究亚马逊河流域植物与土壤关系的过程中, 对包括HWSD和SoilGrids在内的3个土壤数据集进行比较, 发现基于HWSD和SoilGrids提供数据所建立的回归模型效果较好, 而且SoilGrids能弥补HWSD在数据精度方面的不足。

2.3 生境异质性数据

为方便研究人员高效使用高分辨率、标准化的生境异质性数据, Tuanmu 和 Jetz (2015)基于对MODIS遥感数据进行处理得到的增强植被指数EVI (Enhanced Vegetation Index)数据, 开发了一套分辨率为1 km的陆地生态系统生境异质性数据集 EarthEnv-Habitat Heterogeneity (<http://www.earthenv.org/texture>)。该数据集包含1 km、5 km和25 km三种不同空间分辨率的数据, 包括6个一阶变量和8个二阶变量(表1)。其中, 一阶变量描述的是一个区域内所有栅格(pixels)的EVI分布频率与不同组成之间的关系; 二阶变量则是用来描述一个区域内各栅格间不同EVI组合的出现概率(Tuanmu & Jetz, 2015)。

表1 全球生境异质性的测度变量。EVI: 增强型植被指数(来源: <http://www.earthenv.org/texture>)。
Table 1 Texture measures from Global Habitat Heterogeneity. EVI, Enhanced vegetation index (Source: <http://www.earthenv.org/texture>).

	度量 Metric	测度 Measure
一阶变量 First-order variables	变量系数 Coefficient of variation	EVI的标准分散度 Normalized dispersion of EVI
	均匀度 Evenness	EVI的均匀度 Evenness of EVI
	范围 Range	EVI范围 Range of EVI
	Shannon指数	EVI的多样性 Diversity of EVI
	Simpson指数	EVI的多样性 Diversity of EVI
	标准差 Standard deviation	EVI的离散度 Dispersion of EVI
二阶变量 Second-order variables	对比度 Contrast	相邻栅格之间EVI的指数加权差异 Exponentially weighted difference in EVI between adjacent pixels
	相关度 Correlation	相邻栅格之间EVI的线性关系 Linear dependency of EVI on adjacent pixels
	差异性 Dissimilarity	相邻栅格之间EVI的差异 Difference in EVI between adjacent pixels
	熵 Entropy	EVI的无序性 Disorderliness of EVI
	同质性 Homogeneity	相邻栅格之间EVI的相似性 Similarity of EVI between adjacent pixels
	最大值 Maximum	相邻栅格之间EVI的优势组合 Dominance of EVI combinations between adjacent pixels
	一致性 Uniformity	EVI的有序性 Orderliness of EVI

3 土地覆盖数据集

土地覆盖信息对理解和模拟地球系统的动力学过程至关重要,也是生物多样性研究的环境背景调查中不可缺少的一部分(Pielke et al, 1998)。近年来,利用遥感数据进行植被监测和土地覆盖变化方面的研究日益增多,其数据精度和质量也得到了极大的提升。本部分从森林覆盖和土地覆盖两方面对相关的数据集进行简要介绍(附录2)。

3.1 全球森林覆盖及其变化数据

鉴于全球范围内森林覆盖数据不完整以及早年数据分辨率过低的问题,Hansen等(2013)利用Landsat-7卫星数据重新绘制了2000–2012年间30 m空间分辨率的森林覆盖与变化图,并通过计算发现,在此期间全球森林覆盖面积有230万km²的减少和80万km²的植被恢复。该森林覆盖范围图可以从网站直接下载(<http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>)。基于该数据库,Haddad等(2015)在对全球的森林破碎化程度的研究中得出了全球70%的森林距其边界只有不到1 km距离的结论,并指出栖息地的破碎化会导致全球生物多样性出现不同程度的降低。Margono等(2014)使用该森林覆盖与变化图分析了2000–2012年间的植被变化,发现印度尼西亚是全球范围内森林覆盖率下降最快的地区,共计有6.02 Mha的森林消失,即平均每年丧失的森林覆盖面积高达47,600 ha。

除了Hansen等(2013)的工作,Simard等(2011)使用搭载在ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite)上的GLAS (Geoscience Laser Altimeter System)记录的数据,构建了1 km空间分辨率的全球森林林冠层高度地图(<http://lidarradar.jpl.nasa.gov>)。基于该数据,研究者们也已开展了一系列工作。Hayashi等(2013)通过与日本的北海道和钏路地区的地面调查数据的比较,对该数据的准确性进行了验证。Zhang等(2016)通过整合该数据集和其他数据源,分析了全球林冠层高度与当前气候、历史气候以及人类干扰因素等因子之间的关系。鉴于森林林冠层高度和生物量之间的高相关性,该数据也被用于不同区域的森林生物量的估计研究中(Zhang et al, 2014; Margolis et al, 2015; Avitabile et al, 2016)。

3.2 全球土地覆盖及其变化数据

全球土地覆盖数据是了解人类活动与全球变

化之间复杂关系的重要信息来源(Ellis et al, 2013)。基于遥感手段建立的常用土地覆盖数据集有MODIS LandCover 和 GlobCover 等。MODIS LandCover (https://webmap.ornl.gov/ogc/dataset.jsp?ds_id=10004)是基于Aqua和Terra两颗卫星在2001–2007年间的全球遥感影像所建立的数据集,其数据空间分辨率为500 m。数据以5种不同的方案分类,这5种方案分别是IGBP全球植被分类方案(IGBP Global Vegetation Classification Scheme)、马里兰大学方案(University of Maryland Scheme)、MODIS的LAI/fPAR分类方案(MODIS-Derived LAI/fPAR Scheme)、MODIS的净初级生产力方案(MODIS-Derived Net Primary Production Scheme)和植物功能类型方案(Plant Functional Type Scheme)。GlobCover数据(http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php)来自于欧洲航空局(European Space Agency)监管下的土地覆盖监测计划,该数据集包括2004年12月至2006年6月及2009年1月至12月两段时期的数据,其数据空间分辨率为300 m。另外,Tuanmu和Jetz (2014)对已有数据集在空间异质性上的缺陷进行分析后,建立了一个连续的全球土地覆盖数据集EarthEnv-Landcover (<http://www.earthenv.org/landcover>)。该数据面向公众开放,数据空间分辨率为1 km。其中包括的土地覆盖类别有常绿针叶林、落叶针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、混交林、城市/建筑、冰雪覆盖、荒地和开阔水体等。

除上述工作外,由我国科学家牵头开发的全球土地覆盖及其变化数据集如GlobalLand30和FROM-GLC (Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover)也在国际上产生了积极的影响。GlobalLand30 (<http://globallandcover.com/home/background.aspx>)是国家基础地理信息中心利用Landsat Thematic Mapper (TM)数据和中国环境减灾卫星等的多光谱影像开发的一个覆盖地球上南北纬80°以内陆地范围的地表覆盖数据集,其数据分辨率为30 m。主要数据包括:全球和区域的地表覆盖数据、全球MODIS NDVI (归一化植被指数)时间序列数据、全球基础地理信息数据、各种专题数据(全球红树林、湿地、冰川等)和在线高分辨率影像数据等。FROM-GLC是清华大学研究团队基于2010年Landsat TM和Landsat Enhanced TM Plus (ETM+)的遥感数据所绘制的30 m空间分辨率

的全球土地覆盖地图(Gong et al, 2013), 数据可以从网站免费下载(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)。

4 水文数据集

地表水的分布及其持续性受到气候和人类活动的共同影响, 同时又反过来影响着气候、生物多样性和人类福祉等。据统计, 1984–2015年期间, 近90,000 km²的永久地表水已经消失(Pekel et al, 2016), 因此, 与之相关的生物多样性变化也备受关注。本部分从全球湖泊分布和淡水分布两个方面对全球水资源分布数据集进行了简要介绍。

4.1 全球湖泊分布及其变化数据

湖泊是生物地球化学和生态过程的关键组成部分, 其地理分布、表面积和体积等数据对了解湖泊在地球系统内的作用至关重要。Messenger等(2015)建立了一个新型地理统计模型, 根据湖泊周围的地形信息, 估计了全球面积10 ha以上湖泊的体积, 构建了HydroLAKES 数据集(<http://www.hydrosheds.org/page/hydrolakes>)。该数据集数据空间分辨率为500 m, 地图比例尺在1:100,000到1:250,000之间, 包括了全球约142万个湖泊的分布、湖岸线长度、湖水深度和水量等信息, 可直接从网站下载使用。

4.2 全球淡水分布

淡水生境是生物多样性的关键区域(Strayer & Dudgeon, 2010)。Pekel等(2016)利用Landsat系列卫星所拍摄的近300万张卫星照片量化了近32年来全球地表水的长期变化过程, 校正了全球地表水的空间变异性, 建立了一个新的全球地表水分布数据集(<https://global-surface-water.appspot.com/>)。该数据集记录了地表水域的时空分布变化以及水体在季节性、循环性和持久性等方面的变化信息。

HydroSHEDS (<http://hydrosheds.org/>) 是基于SRTM数据制作的全球淡水分布数据集, 其数据包括地形、河流网络和流域边界等信息(Lehner et al, 2008)。Domisch等(2015)在HydroSHEDS的基础上建立了分辨率为1 km的EarthEnv上的淡水分布数据集(<http://www.earthenv.org/streams>)。该数据集包括了河流及其子流域上游环境的信息(气候、地形、土地覆盖等), 已被用在淡水生物多样性等方面的研究中(Iversen et al, 2017)。

5 其他数据集

除气候、地形地貌与土壤、生境异质性、土地覆盖和水文等环境要素外, 人类活动、自然灾害以及保护区地理位置等也对生物多样性分布与物种保护等有直接或间接的影响。以下选取部分相关数据集加以介绍(附录2)。

5.1 人口历史分布数据

人类及其土地利用方式已经改变了全球大部分陆地生物圈的生态系统格局与过程(Ellis et al, 2010)。不同历史时期的人口数据可以作为生态学研究人类活动影响的重要指标。目前主要的人口历史分布数据集包括:

(1)全球人类影响指数(Global Human Influence Index)和全球人类足迹(Global Human Footprint)是Last of the Wild下的两个子数据集(<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/wildareas-v2/sets/browse>), 由野生生物保护协会(Wildlife Conservation Society)和哥伦比亚大学的国际地球科学信息中心(the Center for International Earth Science Information Network)共同开发维护。数据集时间覆盖范围为1995–2004年, 空间分辨率为1 km。

(2)全球环境历史数据集(History Database of the Global Environment, HYDE; <http://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/hyde/index.html>)由荷兰环境评估局开发, 用于表征过去12,000年来人口时间序列和土地利用变化的情况。该数据集提供各国国内生产总值变化、畜牧业和农业面积变化等一系列与人类活动相关的数据。目前, HYDE数据集已被广泛地使用在生物多样性、气候重建和碳循环分析等多个领域中(Gaston et al, 2003; Goldewijk et al, 2010; Ellis et al, 2013)。

(3) KK10 数据集 (<https://www.unil.ch/idyst/en/home/menuinst/research-topics/natural-and-anthropogenic-ec/atmosphere-regolith-vegetati/the-kk10-global-scenario-of.html>)是关于近8,000年来人类土地利用变化的历史数据集。KK10建立在人口密度和人类土地利用之间定量关系的基础上, 结合历史人口数据来估算土地利用变化历史(Kaplan et al, 2011)。

(4)欧盟委员会对Landsat在1975、1990、2000和2014年所获得的数据分析处理后制成了250 m空间分辨率的全球居民区数据集GHS-POP (Global

Human Settlement-Population; http://ghsl.jrc.ec.europa.eu/ghs_pop.php).

(5) Gaughan等(2016)结合1990、2000和2010年间我国的人口普查数据,绘制了100 m空间分辨率的中国人口分布数据集,该数据集中的人口数据可以直接从全球人口数据网站 WorldPop (<http://www.worldpop.org.uk>)下载。

5.2 全球自然灾害数据

全球自然灾害数据平台(Global Risk Data Platform; <http://preview.grid.unep.ch/index.php?preview=home&lang=eng>)的数据内容包括已发生的各类危险事件,如经济危机事件和自然灾害风险等。其中自然灾害数据包括干旱、洪水、山体滑坡、海啸、地震、火山爆发等。除此之外,全球燃烧物排放数据集(Global Fire Emissions Database; <http://www.globalfiredata.org/>)描述了全球火灾活动信息,整合了每月燃烧区域面积(Giglio et al, 2013)和燃烧物气体排放量(van der Werf et al, 2017)等信息。该数据集的时间覆盖范围为1997–2016年,空间分辨率为0.25°。

5.3 植被生产力数据

目前可获得的全球总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)和净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据集是通过整合MODIS卫星监测数据及全球自然资源、土地管理、碳循环过程和生态系统情况调查数据等建立而成的。GPP数据集为MOD17A2H (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod17a2h_v006), NPP数据集为MOD17A3H (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod17a3h_v006)。卫星监测数据每间隔8天记录1次,以此为基础计算出GPP和NPP的年平均值得(Running & Zhao, 2015),其空间分辨率均为500 m。

5.4 主要气象数据

全球范围内常用的气象数据集有Climate Research Unit (CRU, <http://www.cru.uea.ac.uk/about-cru>; Harris et al, 2014)和Global Precipitation Climatology Centre (GPCC, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>; Schneider et al, 2014)。CRU数据集是英国东英格利亚大学整合已有数据而建立的一套连续的陆地气候数据集,包含温度和降水两类数据,时间范围从1901年至今,空间分辨率为0.5°。GPCC数据集由

德国气象局建立,收集了全球范围内190个国家共计85,000个地面站点的降水数据,时间范围从1901年至今,包含0.5°、1°和2.5°三种不同的空间分辨率。通过王丹和王爱慧(2017)基于中国大陆地区的气象站1901–2013年的实测降水资料对CRU和GPCC的降水数据比较发现,两者均能较准确地描述中国大陆地区的降水特征,但GPCC的适用性优于CRU。

国内常用的气象数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),数据集包括地面、高空、海洋等14种类型的气象数据,其中包括中国地面气象站逐小时的气象观测值以及1981–2010年间的按日、月、年划分的地面气候数据等。

5.5 全球光污染数据

近年来,光污染问题已经引起了众多研究者的关注(Hölker et al, 2010; Gaston et al, 2013)。Falchi等(2016)通过将高精度卫星成像数据与全球20,865个地面数据相结合,绘制了一套全球光污染地图(<http://doi.org/10.5880/GFZ.1.4.2016.001>)。结果显示,当前世界80%以上的地区都受到了不同程度的人工光线污染,这种趋势还在持续恶化,并影响着动植物的繁殖、迁徙、传粉等行为(Knop et al, 2017; Rodríguez et al, 2017; Silva & Kempnaers, 2017; Welbers et al, 2017)。

5.6 全球云层覆盖数据

云层覆盖影响着动植物繁殖、生长和存活等(Hare & Cree, 2010)。Wilson和Jetz (2016)使用了自1971年来5,338个气象站收集的全球云层观测数据,结合MODIS卫星影像中的云层变化信息,建立了一个分辨率为1 km的全球云层覆盖数据集(<http://www.earthenv.org/cloud>),并探讨了云层覆盖数据在生物多样性分布、物种分布建模等方面的应用前景。

5.7 行政区划边界地图

全球行政区划数据集(Database of Global Administrative Areas, GADM; <http://www.gadm.org/>)包括了全球大部分国家和地区,共294,430个行政区域边界的信息数据,网站提供多种格式的数据以便研究人员下载使用。

5.8 保护区边界地图

Protected Planet (www.protectedplanet.net)数据

集记录了全球最新和最完整的保护区信息,数据由各国、各地区的政府或非政府组织以及土地所有者等提供更新。该数据集面向公众开放,由UNEP-WCMC (联合国环境规划署全球保护监测中心)在IUCN (世界自然保护联盟)和WCPA (世界保护区委员会)支持下进行管理。

6 小结

基于以上对各种类型环境数据集的介绍可以发现,随着监测手段的不断革新和监测范围的不断扩大,与10多年前相比,研究人员能获得的数据在数量和精度等方面都有了很大的提升。本文仅选取了气候、地形地貌、土壤、生境异质性、土地覆盖和水文等方面的部分数据集,远不能涵盖目前所能获得的并且在不断增加的环境数据。仅在我们准备本文的这段时间内,又有很多新的数据集涌现出来。例如,CHELSA全球30 arc-second (~1 km)气候数据(<http://chelsea-climate.org/>)、高分辨率(100 m)的非洲土地覆盖数据(<http://land.copernicus.eu/global/products/lc>)、古气候数据集PaleoView (Fordham et al, 2017)、全球250 m和1 km分辨率的人类居住环境(Human Settlement)数据(<http://www.statsmapsnpix.com/2016/10/the-global-human-settlement-layer.html>)等(附录2)。尽管如此,海量增长的生态学相关的环境数据仍有一些不足之处。

首先,公众可获得的现有环境数据在数量和质量上仍有待提升。在本文介绍各类型数据中,以地面调查数据为基础的数据集如气候数据、土壤数据等,都在空间分布和时间分布上存在着极大的偏差。以全球历史气候网络数据GHCN为例,全球10万多个地面气象站仅包括了228个中国站点、52个泰国站点、14个新西兰站点,而美国有57,365个站点、加拿大有8,645个站点。尽管以卫星遥感为平台而获得的数据采样偏差相对较小,但在与地面数据进行验证时,很多区域又缺少足够数量和高质量的验证点(Turner et al, 2003)。这些都限制了很多环境数据在生态学和生物多样性相关研究中的应用。近年来,随着各类高精度检测设备和监测手段的涌现和普及(Turner, 2014),数据的分辨率无论是时间还是空间上都得到了极大提升,但更多数据的积累仍需要科研工作者跨区域、跨行业的交流与合作。

其次,数据的整合和利用上也存在着数据零

散、格式不统一以及未能公开等问题(张健, 2017)。近年来,在各国政府、出版机构和科研机构等的共同努力下,一些数据共享平台应运而生,如DataOne (<https://www.dataone.org/>)、Figshare (<https://figshare.com/>)以及由国内研究人员建立的免费科学数据共享平台DataOpen (<http://www.dataopen.info/>)等,这些都给相关数据的整合和深入挖掘提供了可能。另外,更为重要的是,这些海量数据只有为我们所用才能实现其价值,在生物多样性相关数据的挖掘上,我国科研人员与北美、欧洲等国家和地区还有很大差距。我们建议生态学研究人员更深入地挖掘各类生物多样性数据,使其被充分有效地运用在研究、保育以及政策制定等诸多方面(邵广昭等, 2014; 张健, 2017; 王昕等, 2017),这也是我们写这篇文章的初衷。

综上所述,本文通过对气候、地形地貌、土壤、生境异质性、土地覆盖和水文等方面常用环境数据集的系统整理以及一些代表性数据集的介绍,希望为这方面工作的研究者在数据利用上的各取所需提供便利。另外,需要指出的是,生物多样性相关的工作也离不开物种分布、生物编目和生活史特征等信息。与环境数据的现状类似,这些生物数据也同样存在着分布零散、缺少系统化和标准化等问题。王昕等(2017)对陆地生态系统的物种分布、编目、系统发育及生活史性状等数据的总结以及邵广昭等(2014)对海洋生态系统生物多样性信息资源的总结都为相关研究提供了参考。随着可获得的环境数据和生物数据的不断积累及有效整合,将极大地促进我们对物种形成与分化、生物多样性维持、生物多样性与生态系统功能关系等生态学基本问题的理解,同时,我们也应当积极地推动这些理论成果有效地应用到物种保护、入侵种防治和生态恢复等实践中去。

致谢: 感谢责任编辑和三位审稿专家对本文提出的宝贵修改意见和耐心指导!

参考文献

- Ackerly DD, Loarie SR, Cornwell WK, Weiss SB, Hamilton H, Branciforte R, Kraft NJB (2010) The geography of climate change: Implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions*, 16, 476–487.

- Avitabile V, Herold M, Heuvelink GBM, Lewis SL, Phillips OL, Asner GP, Armston J, Ashton PS, Banin L, Bayol N, Berry NJ, Boeckx P, Jong BHH, Vries B, Girardin CAJ, Kearsley E, Lindsell JA, Lopez-Gonzalez G, Lucas R, Malhi Y, Morel A, Mitchard ETA, Nagy L, Qie L, Quinones MJ, Ryan CM, Ferry SJW, Sunderland T, Laurin GV, Gatti RC, Valentini R, Verbeeck H, Wijaya A, Willcock S (2016) An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, 22, 1406–1420.
- Barton CM, Tortosa JEA, Garcia-Puchol O, Riel-Salvatore JG, Gauthier N, Conesa MV, Bouchard CP (2018) Risk and resilience in the late glacial: A case study from the western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*. Doi: 10.1016/j.quascirev.2017.09.015.
- Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR, Lugato E, Ballabi C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Oost KV, Montanarella L, Panagos P (2013) An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8, 1–13.
- Burrows MT, Schoeman DS, Richardson AJ, Molinos JG, Hoffmann A, Buckley LB, Moore P, Brown JC, Bruno JF, Duarte CM, Halpern BS, Hoegh-Guldberg O, Kappel CV, Kiessling W, O'Connor MI, Pandolfi JM, Parmesan C, Sydeman WJ, Ferrier S, Williams KJ, Poloczanska ES (2014) Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity. *Nature*, 507, 492–495.
- Carroll C, Lawler JJ, Roberts D, Hamann A (2015) Biotic and climatic velocity identify contrasting areas of vulnerability to climate change. *PLoS ONE*, 10, e0140486.
- Cavanaugh NR, Shen SSP (2014) Northern hemisphere climatology and trends of statistical moments documented from GHCN-daily surface air temperature station data from 1950 to 2010. *Journal of Climate*, 27, 5396–5410.
- Chen F, Yang S (2014) Land surface thermal environment during heat wave event measured by satellite observation. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 9260, 926015.
- Chen Y, Zhang J, Jiang J, Nielsen SE, He F (2017) Assessing the effectiveness of China's protected areas to conserve current and future amphibian diversity. *Diversity and Distributions*, 23, 146–157.
- Dobrowski SZ, Abatzoglou J, Swanson AK, Greenberg JA, Mynsberge AR, Holden ZA, Schwartz MK (2012) The climate velocity of the contiguous United States during the 20th century. *Global Change Biology*, 19, 241–251.
- Domisch S, Giuseppe A, Jetz W (2015) Near-global freshwater-specific environmental variables for biodiversity analyses in 1 km resolution. *Scientific Data*, 2, 150073.
- Ellis EC, Goldewijk KK, Siebert S, Lightman D, Ramankutty N (2010) Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 589–606.
- Ellis EC, Kaplan JO, Fuller DQ, Vavrus S, Goldewijk KK, Verburg PH (2013) Used planet: A global history. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110, 7978–7985.
- Falchi F, Cinzano P, Duriscoe DM, Kyba CCM, Elvidge CD, Baugh KE, Portnov BA, Rybnikova NA, Furgoni R (2016) The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2, e1600377.
- Fick S, Hijmans R (2017) WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302–4315.
- Fordham DA, Saltré F, Haythorne S, Wigley TML, Otto-Bliesner BL, Chan KC, Brook BW (2017) Paleoview: A tool for generating continuous climate projections spanning the last 21000 years at regional and global scales. *Ecography*, 40, 1–11.
- Gaston KJ, Blackburn TM, Goldewijk KK (2003) Habitat conversion and global avian biodiversity loss. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270, 1293–1300.
- Gaston KJ, Bennie J, Davies TW, Hopkins J (2013) The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, 88, 912–927.
- Gaughan AE, Stevens FR, Huang Z, Nieves J, Sorichetta A, Lai S, Ye X, Linard C, Hornby GM, Hay SI, Yu H, Tatem A (2016) Spatiotemporal patterns of population in mainland China, 1990 to 2010. *Scientific Data*, 3, 160005.
- Giglio L, Randerson JT, Werf GR (2013) Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFDE4). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118, 317–328.
- Goldewijk KK, Beusen AHW, Janssen P (2010) Long-term dynamic modeling of global population and built-up area in a spatially explicit way: HYDE 3.1. *The Holocene*, 20, 565–573.
- Gong P, Wang J, Yu L, Zhao YC, Zhao YY, Liang L, Niu ZG, Huang XM, Fu HH, Liu S, Li CC, Li XY, Fu W, Liu CX, Xu Y, Wang XY, Cheng Q, Hu LY, Yao WB, Zhang H, Zhu P, Zhao ZY, Zhang HY, Zheng YM, Ji LY, Zhang YW, Chen H, Yan A, Guo JH, Yu L, Wang L, Liu XJ, Shi TT, Zhu MH, Chen YL, Yang GW, Tang P, Xu B, Ciri C, Clinton N, Zhu ZL, Chen J, Chen J (2013) Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 2607–2654.
- Guo QH, Liu J, Li YM, Zhai QP, Wang YC, Wu FF (2016) A near-surface remote sensing platform for biodiversity monitoring: Perspectives and prospects. *Biodiversity Science*, 24, 1249–1266. (in Chinese with English abstract) [郭庆华, 刘瑾, 李玉美, 翟秋萍, 王永财, 吴芳芳 (2016) 生物多样性近地面遥感监测: 应用现状与前景展望. *生物多样性*, 24, 1249–1266.]
- Haddad N, Brudvig L, Clobert J, Davies KF, Gonzalez A, Holt RD, Lovejoy TE, Sexton JO, Austin MP, Collins CD, Cook WM, Damschen E, Ewers RM, Foster BL, Jenkins CN, King AJ, Laurance WF, Levey DJ, Margules C, Melbourne BA,

- Nicholls AO, Orrock J, Song DX, Townshend JRG (2015) Habitat fragmentation and its lasting impact on earth's ecosystems. *Science Advances*, 1, e1500052.
- Hansen MC, Potapov P, Moore R, Hancher M, Turubanova S, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov AV, Chini L, Justice CO, Townshend JRG (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342, 850–853.
- Hare KM, Cree A (2010) Exploring the consequences of climate-induced changes in cloud cover on offspring of a cool-temperate viviparous lizard. *Biological Journal of the Linnean Society*, 101, 844–851.
- Harris I, Jones PD, Osborn TJ, Lister D (2014) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, 623–642.
- Hayashi M, Saigusa N, Oguma H, Yamagata Y (2013) Forest canopy height estimation using icesat/glas data and error factor analysis in Hokkaido, Japan. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 81, 12–18.
- Hengl T, Jesus JMD, Heuvelink G, Gonzalez MR, Kilibarda M, Blagotić A, Wei S, Wright MN, Geng X, Bauer-Marschallinger B, Guevara MA, Vargas R, Macmillan RA, Batjes NH, Leenaars JGB, Ribeiro E, Wheeler I, Mantel S, Kempen B (2017) SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12, e0169748.
- Hijmans R, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hölker F, Moss T, Griefahn B, Kloas W, Voigt CC, Henckel D, Hänel A, Kappeler PM, Völker S, Schwöpe A, Franke S, Uhrlandt D, Fischer J, Klenke R, Wolter C, Tockner K (2010) The dark side of light: A transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society*, 15, 13.
- Huang M, Su QM, Huang SZ (2013) Optimum calculation method of SRTM DEM data based on ArcGIS technology. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 31, 456–460. (in Chinese with English abstract) [黄明, 苏巧梅, 黄诗哲 (2013) 基于ArcGIS计算SRTM数据DEM坡度的最优方法探讨. *四川农业大学学报*, 31, 456–460.]
- Iversen LL, Jacobsen D, Sand-Jensen K (2017) Are latitudinal richness gradients in European freshwater species only structured according to dispersal and time? *Ecography*, 39, 1–3.
- Jarvis A, Reuter HI, Nelson A, Guevara E (2008) Hole-filled SRTM for the globe version 3, from the CGIAR-CSI SRTM 90 m database. <http://srtm.csi.cgiar.org> (accessed on 2017-12-13)
- Kaplan JO, Krumhardt KM, Ellis EC, Ruddiman WF, Lemmen C, Goldewijk KK (2011) Holocene carbon emissions as a result of anthropogenic land cover change. *The Holocene*, 21, 775–791.
- Kerr J, Packer L (1997) Habitat heterogeneity as a determinant of mammal species richness in high-energy regions. *Nature*, 385, 252–254.
- Knop E, Zoller L, Ryser R, Gerpe C, Hörler M, Fontaine C (2017) Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548, 206–209.
- Lehner B, Verdin K, Jarvis A (2008) New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 2008, 89, 93–94.
- Loarie SR, Duffy PB, Hamilton H, Asner GP, Field CB, Ackerman DD (2009) The velocity of climate change. *Nature*, 462, 1052–1055.
- Margolis HA, Nelson RF, Montesano PM, Beaudoin A, Sun G, Andersen H, Wulderg MA (2015) Combining satellite lidar, airborne lidar, and ground plots to estimate the amount and distribution of aboveground biomass in the boreal forest of North America. *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 838–855.
- Margono B, Potapov P, Turubanova S, Stolle F, Hansen MC (2014) Primary forest cover loss in Indonesia over 2000–2012. *Nature Climate Change*, 4, 730–735.
- Marino GP, Kaiser DP, Gu L, Ricciuto DM (2011) Reconstruction of false spring occurrences over the southeastern United States, 1901–2007: An increasing risk of spring freeze damage? *Environmental Research Letters*, 6, 024015.
- Menne MJ, Durre I, Vose RS, Gleason BE, Houston TG (2012) An overview of the Global Historical Climatology Network-Daily database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29, 897–910.
- Messenger ML, Lehner B, Grill G, Nedeva I, Schmitt O (2016) Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 7, 13603.
- Moulatlet G, Zuquim G, Figueiredo FOG, Lehtonen S, Emilio T, Ruokolainen K, Tuomisto H (2017) Using digital soil maps to infer edaphic affinities of plant species in Amazonia: Problems and prospects. *Ecology and Evolution*, 7, 8463–8477.
- Nachtergaele F, van Velthuisen H, Verelst L, Wilberg D (2012) Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Nolan M, Fatland R (2013) New DEMs may stimulate significant advancements in remote sensing of soil moisture. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 84, 233–237.
- Pekel JF, Cottam A, Gorelick N, Belward AS (2016) High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418–422.
- Pielke RA, Avissar R, Raupach M, Dolman AJ, Zeng X, Denning AS (1998) Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: Influence on weather and climate.

- Global Change Biology, 4, 461–475.
- Poorter L, van der Sande MT, Thompson J, Arets EJMM, Alarcón A, Álvarez-Sánchez J, Ascarrunz N, Balvanera P, Barajas-Guzmán G, Boit A, Bongers F, Carvalho FA, Casanoves F, Cornejo-Tenorio G, Costa FRC, Castilho CV, Duivenvoorden JF, Dutrieux LP, Enquist BJ, Fernández-Méndez F, Finegan B, Gormley LHL, Healey JR, Hoosbeek MR, Ibarra-Manríquez G, Junqueira AB, Levis C, Licona JC, Lisboa LS, Magnusson WE, Martínez-Ramos M, Martínez-Yrizar A, Martorano LG, Maskell LC, Mazzei L, Meave JA, Mora F, Muñoz R, Nytch C, Pansonato MP, Parr TW, Paz H, Pérez-García EA, Rentería LY, Rodríguez-Velázquez J, Rozendaal DMA, Ruschel AR, Sakschewski B, Salgado-Negret B, Schiatti J, Simões M, Sinclair FL, Souza PF, Souza FC, Stropp J, ter Steege H, Swenson NG, Thonick K, Toledo M, Uriarte M, van der Hout P, Walker P, Zamora N, Peña-Claros M (2015) Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1314–1328.
- Poorter L, Bongers F, Aide TM, Zambrano AMA, Balvanera P, Becknell JM, Boukili V, Brancalion PHS, Broadbent EN, Chazdon RL, Craven D, Almeida-Cortez JS, Cabral GAL, Jong BHI, Denslow JS, Dent DH, Walt SJ, Dupuy JM, Durán SM, Espírito-Santo MM, Fandino MC, César RG, Hall JS, Hernandez-Stefanoni JL, Jakovac CC, Junqueira AB, Kennard D, Letcher SG, Licona J, Lohbeck M, Marín-Spiotta E, Martínez-Ramos M, Massoca P, Meave JA, Mesquita R, Mora F, Muñoz R, Muscarella R, Nunes YRF, Ochoa-Gaona S, Oliveira AA, Orihuela-Belmonte E, Peña-Claros M, Pérez-García EA, Piotto D, Powers JS, Rodríguez-Velázquez J, Romero-Pérez IE, Ruíz J, Saldarriaga JG, Sanchez-Azofeifa A, Schwartz NB, Steininger MK, Swenson NG, Toledo M, Uriarte M, van Breugel M, van der Wal H, Veloso MDM, Vester HFM, Vicentini A, Vieira ICG, Bentos TV, Williamson GB, Rozendaal DMA (2016) Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530, 211–214.
- Razafindrajao F, Bamford AJ, Young HG, Andrianarimisa A, Aboudou AIB, Lewis RE (2017) Reassessing the conservation outlook for Madagascar's endemic Anotidae following the creation of new protected areas. *Wildfowl*, 67, 72–86.
- Robinson N, Regetz J, Robert G (2014) EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90 m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 57–67.
- Rodríguez A, Holmes ND, Ryan PG, Wilson K, Faulquier L, Murillo Y, Raine AF, Penniman JF, Neves V, Rodríguez B, Negro JJ, Chiaradia A, Dann P, Anderson T, Metzger B, Shirai M, Deppe L, Wheeler J, Hodum P, Gouveia C, Carmo V, Carreira GP, Delgado-Alburquerque L, Guerra-Correa C, Couzi F, Travers M, Corre ML (2017) Seabird mortality induced by land-based artificial lights. *Conservation Biology*, 31, 986–1001.
- Running SW, Zhao M (2015) User's Guide, Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm, Version 3.0 For Collection 6. University of Montana, USA, NASA.
- Sandel B, Arge L, Dalsgaard B, Davies RG, Gaston KJ, Sutherland WJ, Svenning JCS (2011) The influence of Late Quaternary climate-change velocity on species endemism. *Science*, 334, 660–664.
- Schneider U, Becker A, Finger P, Meyer-Christoffer A, Ziese M, Rudolf B (2014) GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled *in situ* data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 115, 15–40.
- Shao KZ, Lee H, Lin YC, Lai KQ (2014) A review of marine biodiversity information resources. *Biodiversity Science*, 22, 253–263. (in Chinese with English abstract) [邵广昭, 李瀚, 林永昌, 赖昆祺 (2014) 海洋生物多样性信息资源. 生物多样性, 22, 253–263.]
- Silva AD, Kempnaers B (2017) Singing from north to south: Latitudinal variation in timing of dawn singing under natural and artificial light conditions. *Journal of Animal Ecology*, 86, 1286–1297.
- Simard M, Pinto N, Fisher JB, Baccini A (2011) Mapping forest canopy height globally with spaceborne LiDAR. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116, G04021.
- Song YC (2017) *Vegetation Ecology*, 2nd edn. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [宋永昌 (2017) 植被生态学(第二版). 高等教育出版社, 北京.]
- Stisen S, Tumbo M (2015) Interpolation of daily raingauge data for hydrological modelling in data sparse regions using pattern information from satellite data. *Hydrological Sciences Journal*, 60, 1911–1926.
- Strayer D, Dudgeon D (2010) Freshwater biodiversity conservation: Recent progress and future challenges. *Journal of the North American Benthological Society*, 29, 344–358.
- Stralberg D, Matsuoka SM, Hamann A, Bayne EM, Solymos P, Schmiegelow FKA, Wang X, Cumming SG, Song S (2015) Projecting boreal bird responses to climate change: The signal exceeds the noise. *Ecological Applications*, 25, 52–69.
- Szabolcs Z, Mizsei E, Jablonski D, Vági B, Mester B, Végvári Z, Lengyel S (2017) Distribution and diversity of amphibians in Albania: New data and foundations of a comprehensive database. *Amphibia-Reptilia*, 38, 435–448.
- Su Y, Guo Q (2014) A practical method for SRTM DEM correction over vegetated mountain areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 216–228.
- Sunday JM, Pecl G, Frusher S, Hobday AJ, Hill NA, Holbrook NJ, Edgar GJ, Stuart-Smith RD, Barrett NS, Wernberg T, Watson R, Smale DA, Fulton EA, Slawinski D, Feng M, Radford BT, Thompson PA, Bates AE (2015) Species traits and climate velocity explain geographic range shifts in an ocean-warming hotspot. *Ecology Letters*, 18, 944–953.
- Tuanmu M, Jetz W (2014) A global 1-km consensus land-cover

- product for biodiversity and ecosystem modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 1031–1045.
- Tuanmu M, Jetz W (2015) A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1329–1339.
- Turner W, Spector S, Gardiner EP, Fladeland M, Sterling E, Steininger M (2003) Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 306–314.
- Turner W (2014) Sensing biodiversity. *Science*, 346, 301–302.
- van Andel TR, Croft S, van Loon EE, Quiroz D, Towns AM, Raes N (2015) Prioritizing West African medicinal plants for conservation and sustainable extraction studies based on market surveys and species distribution models. *Biological Conservation*, 181, 173–181.
- van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L, van Leeuwen TT, Chen Y, Rogers BM, Mu M, Marle M, Morton DC, Collatz GJ, Yokelson RJ, Kasibhatla PS (2017) Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data*, 9, 697–720.
- Wang D, Wang AH (2017) Applicability assessment of GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013. *Climatic and Environmental Research*, 22, 446–462. (in Chinese with English abstract) [王丹, 王爱慧 (2017) 1901–2013年GPCC和CRU降水资料在中国大陆的适用性评估. *气候与环境研究*, 22, 446–462.]
- Wang T, Hamann A, Spittlehouse DL, Aitken SN (2006) Development of PRISM-based scale-free climate data for western Canada for use in resource management. *International Journal of Climatology*, 26, 383–397.
- Wang X, Zhang FL, Zhang J (2017) Biodiversity information resources. I. Species distribution, catalogue, phylogeny, and life history traits. *Biodiversity Science*, 25, 1223–1238. (in Chinese with English abstract) [王昕, 张凤麟, 张健 (2017) 生物多样性信息资源. I. 物种分布、编目、系统发育与生活史性状. *生物多样性*, 25, 1223–1238.]
- Warren DL, Glor RE, Turelli M (2008) Environmental niche equivalency versus conservatism: Quantitative approaches to niche evolution. *Evolution*, 62, 2868–2883.
- Weigelt P, Jetz W, Kreft H (2013) Bioclimatic and physical characterization of the world's islands. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110, 15307–15312.
- Weigelt P, Steinbauer MJ, Cabral JS, Kreft H (2016) Late Quaternary climate change shapes island biodiversity. *Nature*, 532, 99–102.
- Welbers AAMH, van Dis NE, Kolvoort AM, Ouyang J, Visser ME, Spoelstra K, Dominoni DM (2017) Artificial light at night reduces daily energy expenditure in breeding great tits (*Parus major*). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 231, 882–889.
- Whittaker RH (1975) *Communities and Ecosystem*. Macmillan, London.
- Wilson AM, Jetz W (2016) Remotely sensed high-resolution global cloud dynamics for predicting ecosystem and biodiversity distributions. *PLoS Biology*, 14, e1002415.
- Yeaman S, Hodgins KA, Lotterhos K, Suren H, Nadeau S, Degner JC, Nurkowski KA, Smets P, Wang T, Gray LK, Liepe K, Hamann A, Holliday JA, Whitlock MC, Rieseberg LH, Aitken SN (2016) Convergent local adaptation to climate in distantly related conifers. *Science*, 353, 1431–1433.
- Yue TX, Chen CF, Li BL (2012) A high accuracy method for filling SRTM voids and its verification. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 2815–2830.
- Zhang J, Huang S, Hogg EH, Lieffers V, Qin Y, He F (2014) Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data. *Biogeosciences*, 11, 2793–2808.
- Zhang J, Huang S, He F (2015) Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 112, 4009–4014.
- Zhang J, Nielsen SE, Mao L, Chen S, Svenning JCS (2016) Regional and historical factors supplement current climate in shaping global forest canopy height. *Journal of Ecology*, 104, 469–478.
- Zhang J (2017) Biodiversity science and macroecology in the era of big data. *Biodiversity Science*, 25, 355–363. (in Chinese with English abstract) [张健 (2017) 大数据时代的生物多样性科学与宏生态学. *生物多样性*, 25, 355–363.]

(责任编辑: 纪力强 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 WorldClim数据库包括的19个生物气候因子

Appendix 1 19 bioclimatic factors included in the WorldClim database

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017189-1.pdf>

附录2 文中环境类型数据库列表

Appendix 2 The list of environmental databases mentioned in the paper

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017189-2.pdf>