

DOI: 10.5846/stxb201707251338

刘焱序,傅伯杰,王帅,赵文武.从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展.生态学报,2017,37(23):7761-7768.

Liu Y X, Fu B J, Wang S, Zhao W W. From biogeography to ecological function: Progress and prospect of global ecological regionalization research. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7761-7768.

从生物地理区划到生态功能区划 ——全球生态区划研究进展

刘焱序¹, 傅伯杰^{1,2,*}, 王 帅¹, 赵文武¹

1 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 全球生态区划可以为全球和区域的生态系统保护与管理起到关键的空间指引作用, 但当前全球生态区划方案存在重视生物地理分布特征而忽视生态系统服务的问题。系统梳理了全球生态区划研究进展, 并总结为萌芽、发展和再认识的 3 个阶段。Bailey 和 Olson 等的两套全球生态区划方案在近 40 年来使用最为广泛, 但两套以生物多样性保护为区划目标的方案均属于生物地理区划范畴。为实现对区域生态安全保障和人地关系协调的全面支持, 有必要开展以功能区划为主的全球生态区划研究, 进一步完善生态区划理论体系、探索生态区划方法集成、突出生态系统服务权衡并聚焦人地关系动态演化。

关键词: 生物地理区; 生态功能区; 生物多样性; 生态系统服务; 人地关系

From biogeography to ecological function: Progress and prospect of global ecological regionalization research

LIU Yanxu¹, FU Bojie^{1,2,*}, WANG Shuai¹, ZHAO Wenwu¹

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Global ecological regionalization plays a key role in spatially guiding the conservation and management of ecosystems at global and regional scales. However, the current zoning scheme for the global ecoregion has some limitations, as it focuses on the geographical distribution of biodiversity characteristics while neglecting the ecological services for human beings. This study systematically demonstrates the research progress of global ecological regionalization. The course has been summarized into three stages: rudiment, development, and reconsideration. Two sets of global ecoregion schemes have been most widely applied in the last 40 years. Nevertheless, both schemes belong to the category of biogeographic regionalization, with the objective of biodiversity conservation. To understand the comprehensive support for regional ecological security as well as coordinate the human-nature relationship, it is necessary to study global ecological functional regionalization on the basis of ecosystem services. Four future directions for this research goal have been set: further improvement of the theoretical system of ecological regionalization, exploration of the integration of ecological regionalization methods, highlighting the trade-off of ecosystem services, and focusing on the dynamic evolution of the human-nature relationship.

Key Words: biogeographic ecoregion; ecological functional ecoregion; biodiversity; ecosystem services; human-nature

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604701)

收稿日期: 2017-07-25; 修订日期: 2017-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@rcees.ac.cn

relationship

生态区划是对生态区域和生态单元的划分或合并研究^[1]。面对全球环境变化下生态系统受到的长期扰动,生态区划可以有效揭示自然生态区域的相似性和差异性规律、归纳外部扰动对区域生态系统的影响,业已成为生态系统和自然资源合理管理及持续利用的重要支撑^[2]。自 Bailey 系统提出美国生态区划方案以来^[3-4],生态区划理论与方法在上世纪末至本世纪初取得快速发展^[5-6]。世界野生动物基金会(World Wildlife Fund, WWF)和大自然保护协会(The Nature Conservancy, TNC)发布的全球陆地生态区划方案被广泛采用^[6],为全球和区域生态系统保护与管理发挥了关键的空间指引作用^[7-10]。

生态区划方案依存于区划的对象和目的^[2]。以生态系统保护为目标,国际生态区划多以自然生态系统为对象,而较少考虑人类在生态系统中作用^[11-12]。近年来国际学者也逐渐认识到,生态区划方案中的优先保护区虽然能达成保护生物多样性的目的,但与陆地生态系统服务没有密切关系^[13-14]。因此,面向生物多样性保护的全球生态区划方案在引导不同国家和地区生态系统综合管理实践中仍有不足。针对当前全球生态区划重生物地理分布特征、轻生态系统功能与服务的现状,有必要系统回顾全球生态区划研究进展,展望全球生态区划研究发展方向,从而推动生态区划工作切实服务于全球和区域社会-生态综合可持续的管理目标。

1 全球生态区划演进历程

生态区划源于自然地理区划,随着生态学学科体系的逐渐完善,生态区划逐渐从自然地理区划中独立出来,着重强调地理单元中的生态系统特征分异,并逐渐形成了基于不同目标的全球生态区(Ecoregion)划分方案^[15-16]。总体上,全球生态区划研究可以分为萌芽、发展、再认识3个阶段(图1)。尽管3个阶段在时间上有所嵌套,但在不同阶段中学者们对于生态区划的理解在不断深化。

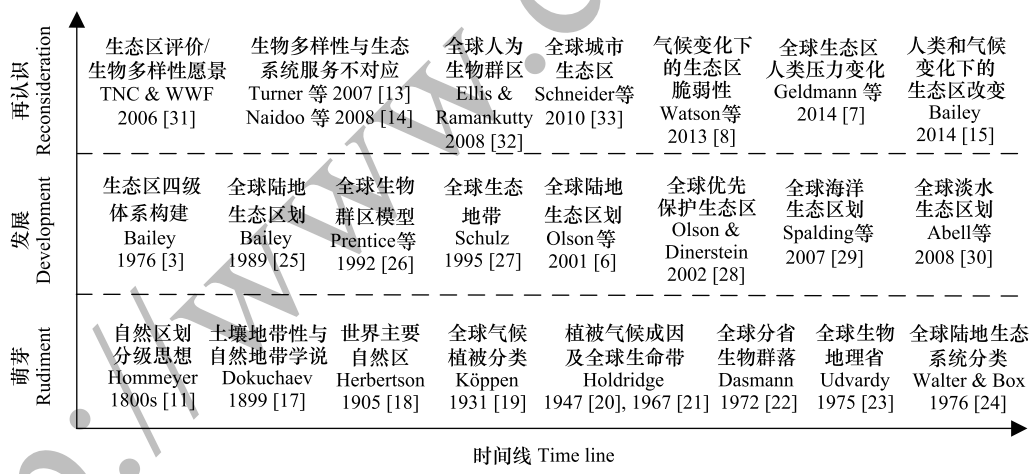


图1 全球生态区划代表性研究的发展时间线

Fig.1 The time line of representative studies on global ecological regionalization

1.1 生态区划思想萌芽

现代地域划分思想可以溯源至 19 世纪初 Hommeyer 的大区域(Land)、区域(Landschaft)、地区(Gegend)、小区(Ort)四分类体系^[11]。1899 年 Dokuchaev 提出的自然地带学说和 1905 年 Herbertson 划分的世界主要自然区中,植被作为地域分异要素被予以描述,但尚不作为主要的分区指标^[17-18];与之鲜明对应的是柯本气候分类方案中将植被作为分区的命名方式^[19]。沿袭 Merriam 的美国生命带(life zones)思想,Holdridge 基于生物温度、降水和蒸散数据识别植被类型并划分全球生命带^[20-21]。Dasmann 首次提出了包含植物和动物区系的全球生物群系分省(Province)划定方案^[22],并在多次修改后由 Udvardy 领衔发布了全球生物地理省区图^[23],全球生物地理区划方案初见雏形。与此同时,Walter 和 Box 并未采用省级分类方式,而直接在生物群区

(Biome)的概念基础上提出全球陆地生态系统的划分准则^[24]。

可见,在 20 世纪前半页,自然地理区划、生态区划、植被类型划分等概念相对模糊^[12]。气候地带性规律是表征生态要素差异的关键准则,植被类型也同时是自然地理区划、气候分类的重要标准。尽管部分区划方式以植被作为研究主体,但也并未涉及生态系统的结构层次。直至 1970s,以分省形式表征动植物区系的方案提出,以及生态系统成为明确的划分对象,体现着生态区划开始有别于表示地表综合特征的自然地理区划和聚焦单一生态系统要素的植被分类。尤其是 Udvardy 等绘制的全球生物地理省方案除了划分单元相对有限以外,已经具备了当代生态区划的研究体系。Dasmann 和 Udvardy 等的多项研究工作无疑为全球生态地理区划体系的全面建立奠定了基础^[22-23]。

1.2 区划方案快速涌现

Bailey 以气候-植被的命名方式首次制成包含生态地域(Domain)、生态大区(Division)、生态省(Province)、生态地段(Section)四级体系的美国生态区划方案,标志着生态区划理论与方法逐渐走向成熟^[3-4]。在反复论证下,Bailey 等将生态区定义为具有相对同质性的生态系统组合^[34-36],并系统的完成了全球陆地生态区划分方案^[25]。在当时,Bailey 的生态区划体系并不唯一。如 Rowe 和 Sheard 以及 Klijn 和 de Haes 立足景观视角分别提出生态用地分类准则,但并未形成全球制图^[37-38];Prentice 等构建的全球生物群落模型和 Schulz 提出的全球生态地带(Ecozone)则体现了欧洲学者对生态区划更为宏观的理解^[26-27]。经过对生态区划理论与方法的长期总结,Bailey 最终提出了生态系统地理学理念^[5],其全球生态区划方案成为了 20 世纪体系最完整的生态区划研究。

然而,以气候为基准的生态区划方法显然在制图精度上有所不足。以生物多样性保护为目标,Olson 等不采用 Bailey 方案,而以全球、洲际和各国多套生物群落区划方案为基础进行融合,这套自下而上的全球生态区划方案形成了 867 个生态区^[6],远高于 Udvardy 方案的 193 个单元^[22]。Olson 和 Dinerstein 同时提供了包括 142 个陆地生态区、53 个淡水生态区和 43 个海洋生态区在内的全球优先保护区^[28,39]。21 世纪以来,全球生态学界对生物多样性保护高度关注,WWF/TNC 所发布的 Olson 等的区划方案也成为目前学界使用最为广泛的全球生态区划图。此后,Spalding 等和 Abell 等也分别提出全球海洋生态区划和全球淡水生态区划,为全球生物多样性保护提供切实指引^[29-30]。

虽然在 1980s 以来洲际、国家尺度的生态分区成果大量涌现,但全球生态分区方案实际屈指可数。这可能是由于在上世纪末全球空间数据资料有限、学者们对局地生态系统特征不了解,导致学者们更倾向于在国家内部践行其区划理念。对比 Bailey 的全球生态区划图,Olson 等集成多国学者区划方案的生态区划成果具有更明确的生态管理目标。加之该区划的矢量文件由机构公开发布、获取便捷,因而成为全球生物多样性研究的关键资料。时至今日,Olson 等的区划方案仍在不断更新之中。最新发布的 Ecoregions2017 方案由 846 个生态区构成,在 2050 年达成保护全球陆域面积的 50%成为该方案的最终目标^[15]。

1.3 对生态区划的再认识

随着全球空间数据的积累,TNC 试图通过更精细的生态区评价(WWF 称之为生物多样性愿景)进一步明晰生态区的长期保护目标,具体而言是通过生物多样性的状况、生境条件、威胁和社会政治条件确定生态区的地理优先级,并不断调整部分生态区边界^[31]。但是,生态区评价并不能解决全球区划方案忽视区域人地关系特征的问题。Turner 等发现,全球生物多样性保护优先区并不与陆地生态系统服务价值的高值呈对应关系^[43,39];Naidoo 等通过生态系统服务制图发现,生物多样性保护优先区的生态系统服务与随机采样区相比并没有明显区别^[14]。因此,即使达成各生态区中的生物多样性优先保护目标,也并不能对人类提供比保护其他区域更多的生态系统服务。

针对生态系统所面临的强烈人类扰动,Ellis 和 Ramankutty 划定了全球人为生物群落^[32],Schneider 等则同时完成了全球城市生态区制图^[33]。Geldmann 等评价近 20 年生态区内的人类压力指数,发现保护区域内的人类压力指数全面增加^[7]。人类活动对生态区造成强烈影响,而当前全球生态区划方案未能充分考虑,往往

会加深生物多样性保护规划实施的难度。此外, Watson 等发现,除了保证生态区自然植被的完整性以外,结合气候情景预测评估生态区的脆弱性,可以更有效的指引区域生态管理^[8]。针对全球生态功能评价手段的不足, Freudenberger 等构建指标体系,探讨全球生态系统功能性制图方式^[40];并依托当前全球生态区划边界,构建生态功能智慧、社会经济智慧、气候变化智慧评价准则,进一步识别生态保护优先区^[41]。时隔近 20 年后, Bailey 在其再版的专著中新增章节,论述生态区域在人类和气候变化的剧烈影响下如何变化^[5]。可见在气候变化与人类活动的双重扰动背景下,学界已经对生态区的研究内容和目标具备了更深入的理解。

2 全球生态区划方案优势与不足

2.1 方案特点与优势

基于区划的对象和目标不难得出, Bailey 和 Olson 等的两套全球生态区划方案均属于生物地理区划范畴。其最明显的特点是通过识别自然生态系统要素特征,提取可以代表生态系统的关键生物群落或物种,将生物的地域分异规律作为核心的区划依据。两套区划方案有细致差别,表现在 Bailey 更倾向于表达全球生物的空间分布规律性,而 Olson 等将成果对接于全球生物多样性保护,后者的方案具备更直接的应用价值。作为生物地理区划的代表,两套方案完整展现了自然生态系统中温度、水分、地貌、植被、土壤等环境因素的空间分异,成功推动了全球生物多样性研究的广泛开展^[42-44]。

生物地理区划的优势正是其区划目标的明确性。在国际上对生态区划再认识的阶段,各项研究将 Olson 等划定的生态区默认为不考虑人类影响和气候变化的生物多样性分布区,从而叠加各种人类活动、气候变化、生态系统服务指标,完成生物多样性胁迫程度、脆弱趋势、对人类影响等不同视角的研究内容。在此类研究中,生物地理区划中的生态区被认为是生物多样性的空间表达方式,可以和其他与生物多样性不直接相关的指标进行对比分析,从而得到更广泛的生态学规律认识。当前,全球动物地理区划等研究对象更明确的生物地理区划仍在陆续开展^[45-47],充分证明的全球生态学研究对生物地理区划的明确需求。

2.2 案不足之处

由于未能充分考虑人地关系,全球生物地理区划的不足之处显而易见。生态区划的应用价值显然不应止于生物多样性保护,而有必要进一步对接全球、区域的生态资源可持续开发和环境综合管理^[48]。一方面,在生物地理区划中忽视人类活动的生态影响,会导致生态系统所受到的胁迫程度不能在生态区单元中有效反映,掩盖区域生态问题^[49-50];另一方面,在生物地理区划中未能体现人类从生态系统中获得的效益,容易致使针对生态区的生态系统管理不能有效服务于地区的可持续发展目标^[51]。这些不足导致了生物地理区划对于生态系统综合管理、生态安全保障与人类福祉维持等更长远目标的支持能力十分有限。

全球生物地理区划的不足是由区划目标的过于单一导致的。因此,在肯定生物地理区划重要价值的基础上,有必要识别生态系统对气候变化、人类扰动的敏感性,以及生态系统服务对人类社会发展的重要性,开展生态功能区划研究^[52]。与生物地理区划侧重于表征生态系统自身结构的地理差异不同,生态功能区划更关注生态系统对于自然和人类干扰的响应,以及生态系统对人类社会提供的服务(表 1)。在研究方式上,敏感性分析改进了生物地理区划对所受胁迫程度表征有限的问题,重要性评价弥补了生物地理区划不能展示生态系统对人类社会效益的缺陷。而相比生物地理区划,生态功能区划与人类社会的关系更加密切,从而增强了区划结果对区域人地关系协调和可持续发展的指引意义。可以预见,立足更加综合的研究视角,践行全球生态功能区划,能够有效系统的形成对全球各级生态分区的再认识。

3 全球生态功能区划展望

鉴于全球生态功能区划目标更加宏观、应用范围更为广泛,区划成果被各领域认可的难度也会相应提升,对区划结果精度保证无疑需要从理论、方法、数据等多方面进行论证。论证内容可以概括为完善生态区划理论体系、探索生态区划方法集成、突出生态系统服务权衡、聚焦人地关系动态演化4个主要方面,其主要内容

表 1 生物地理区划与生态功能区划对比

Table 1 Comparison between biogeographic regionalization and ecological function regionalization

内容 Content	生物地理区划 Biogeographic regionalization	生态功能区划 Ecological function regionalization
目标 Object	生物多样性保护	生态安全保障与生态资源可持续利用
基本单元 Basic unit	生态区	生态功能区
原则 Principle	等级性、发生统一性、地域完整性等	还包括功能协调性、稳定或持续性等
指标 Indicator	气候、植被、土壤、地形等	敏感性、生态系统服务等
技术难点 Technological difficulty	生物多样性的空间表达	人类影响的空间化、服务估算精度等
应用 Application	保护区建设与评价	自然资源管理、社会经济发展规划
全球方案 Global scheme	有、认可度高	无、精度控制难度大

与逻辑关联如图 2 所示。

3.1 完善生态区划理论体系

在生态区划中,特征区划和功能区划并不完全相同。自然地域空间的总体特征往往是相对稳定的,现有的全球生态区划方案基本沿用了自然区划中等级性、发生统一性、地域完整性、主导因素等重要原则,满足了特征区划的研究需要。然而,部分新的问题产生在生态功能区划中。一方面,生态系统往往具有多功能性,有必要关注在外部扰动下这些功能之间的关联方式,并确立一致的主导功能判别依据。另一方面,气候变化下生态功能的年际差异明显,地区快速城市化进程中生态功能与人类社会的供需关系也在持续改变,为保证区划边界的相对稳定,有必要对生态功能的变化作以估计。因此,在传统自然区划原则的基础上,生态功能区划更需要重视区划方案的功能协调性和时间稳定性。

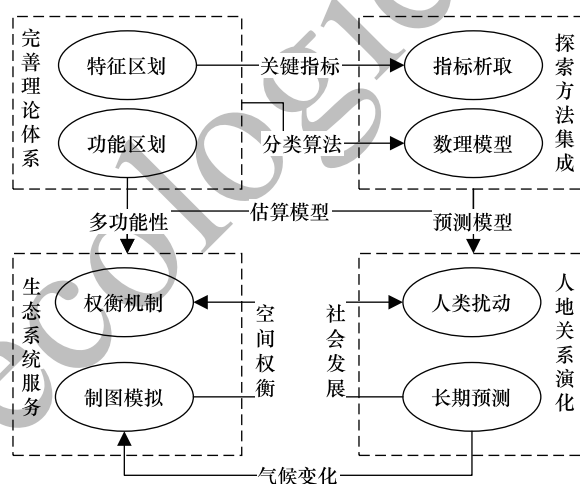


图 2 全球生态区划研究内容

Fig.2 The content of global ecological regionalization

在生态功能区划中,如何理解区划的等级特征与区域共轭特征也值得论证。在国际一些生态区的命名中,往往将温度、水分、地形、植被混合使用,同一类型区在空间上可以重复出现,系统化程度相对低于中国的区划方案^[53]。在中国生态功能区划方案中,也并未沿用传统自然区划的等级结构,而采用地名和生态功能名组合的形式冠名生态功能区,同样保证了区域共轭性。对于全球生态功能区划,若一组生态功能相似的区域在空间上不连续,是否必须将不连续的功能区分成两组;或若同一较小范围的地域空间有多种生态功能组合关系,是否可以采用同一地名组合不同功能的相对模糊的冠名方式? 此类细节关乎区划方案的系统化程度,需要在生态区划理论体系层面给出对应的解读。

3.2 探索生态区划方法集成

生态区划方法集成可以分为数据集成和模型集成两个方面。随着各类全球空间数据的陆续发布,可以用于表征生态系统特征的指标众多,并且指标之间存在着明显的重叠性。例如温度和水分决定了大尺度上植被和土壤的地带性分布,而局地的非地带性规律可以直接反映在水源涵养、土壤保持等生态系统服务的异常上。由于常见的生态指标往往会用于生态系统服务的估算,那么在引入生态系统服务指标后,是否需要关注土壤类型、高程坡度等特征要素,是生态区划指标析取过程必须首先回答的问题。

从传统的数理统计到当代的人工智能算法,模糊聚类、人工神经网络等模型的应用证明了区划阈值的判定并不缺乏定量化手段^[54-55]。然而值得关注的是,大量数学模型本身并不依循等级化的思想完成运算。如近年来被广泛采用的自组织映射神经网络模型(SOFM)会根据数据集的总体取值进行自动分类,在空间上展

示为不同的类型区。但该算法既不会考虑数据集内部指标之间的层级关系,也不能保证每个类型区的主导因素一定具有显著差异特征。因此,该算法作为一种快速分区、分类手段,并不满足区划对结果的系统化要求。此外,很多分类算法并不考虑样本的空间位置,以至于在输入单元较小、精度较高的情况下,容易在空间中形成大量面积较小但属性独特的孤立样本。在孤立样本与周围类型区合并的过程中如何尽量少的损失精度,也牵涉较复杂的方法选择问题。

3.3 突出生态系统服务权衡

生态功能区划的核心是对生态系统服务的空间表达。自 Costanza 完成生态系统服务价值制图后^[56],对生态系统服务的空间化研究是近 20 年来国际生态系统服务研究的重要主题。然而,以文化服务为代表的多项生态系统服务类型很难在全球层面予以精确的空间定位,所以生态系统碳固定、涵养水源、土壤保持等服务成为了主要的制图选择。此类服务尽管在总体上有可能表现为协同关系,但降水和地形条件的不同导致了局地间主导的生态系统服务各不相同。其中难点在于,不同生态系统服务的单位并不相同,并不能直接把相对高值认为是重要的而低值是不重要的,而需要通过量化生态系统服务对地区的实际效用,权衡得出主导生态系统服务类型。

同时,生态系统服务与生态系统类型特征在时间稳定性上是不一致的。作为描述生态系统的特征,气候、土壤、地形、植被类型等要素可以在较长的时间段内保持相对稳定;但生态系统服务在不同的气候和人类扰动下会发生较大的波动,权衡关系也会相应改变。例如降水减少会明显降低土壤保持服务,但对碳固定服务的影响程度则需要视植被类型而论。因此,有必要回溯过去气候波动以及预测未来气候变化对生态系统服务制图造成的影响,识别生态系统服务的稳定区域或持续变化区域,并在生态功能区中予以反映,从而保障生态区划在更长时间段内的应用价值。

3.4 聚焦人地关系动态演化

关注人类社会对生态系统服务的影响和需求,并预测该影响或需求的演化规律,有助于提升生态功能区划对社会可持续发展规划的支持能力。相同等级生态系统服务可以对应较低或较高的人类扰动,其所对应的保护策略显然是不一致的;同理,在不同的人类社会需求下,对相同等级生态系统服务区域的资源使用方式也是有所差异的。为保证生态区划在生态管理实践中的针对性,有必要将人文要素的空间特征反映在生态功能区中。这些人文要素可以通过暴露、压力等准则单独表征,也可以将人类活动强度等指标作为广义上生态敏感性评价的一项指标引入。

相比于气候变化,生态系统服务与人类社会的供需关系或影响程度改变是触发生态系统管理方式变化的更重要原因。尽管对全球人口的长期预测有较高的不确定性,但在精度要求不高的情况下,至少可以基于预测模型输出结果判断大致的未来全球人口分布高低差异。对于人类影响或社会需求与当前状况显著不同的区域,可以在相应的生态功能区中予以特别注明或调整相应边界,从而使区划方案能够在未来一段时间内保持稳定,达成对区域未来相应规划的决策支持目的。事实上,作为一项综合区划,全球生态区划中对人地关系刻画的难点并不在于将人文要素引入区划理论体系的科学性,而是在方法的操作中如何正确处理人文要素与其他自然生态要素的权重关系,使区划成果能够同时服务于区域生态保护和资源可持续开发利用的多重目标,从而在不同领域中具备良好的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. 生态学报, 1999, 19(5): 591-595.
- [2] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [3] Bailey R G. Ecoregions of the United States (1: 7500000 Colored). Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Region, 1976.
- [4] Bailey R G. Ecoregions of the United States (map). Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, 1976.
- [5] Bailey R G. Ecoregions: the ecosystem geography of the oceans and continents. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2014.
- [6] Olson D M, Dinerstein E, Wikramanayake E D, Burgess N D, Powell G V N, Underwood E C, D'amico J A, Itoua I, Strand H E, Morrison J C,

- Loucks C J, Allnutt T F, Ricketts T H, Kura Y, Lamoreux J F, Wettengel W W, Hedao P, Kassem K R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth: a new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 2001, 51 (11): 933-938.
- [7] Geldmann J, Joppa L N, Burgess N D. Mapping change in human pressure globally on land and within protected areas. *Conservation Biology*, 2014, 28(6): 1604-1616.
- [8] Watson J E M, Iwamura T, Butt N. Mapping vulnerability and conservation adaptation strategies under climate change. *Nature Climate Change*, 2013, 3(11): 989-994.
- [9] Winemiller K O, McIntyre P B, Castello L, Fluet-Chouinard E, Giarrizzo T, Nam S, Baird I G, Darwall W, Lujan N K, Harrison I, Stiassny M L J, Silvano R A M, Fitzgerald D B, Pelicice F M, Agostinho A A, Gomes L C, Albert J S, Baran E, Petrere M Jr, Zarfl C, Mulligan M, Sullivan J P, Arantes C C, Sousa L M, Koning A A, Hoetinghaus D J, Sabaj M, Lundberg J G, Armbruster J, Thieme M L, Petry P, Zuanon J, Vilara G T, Snoeks J, Ou C, Rainboth W, Pavanelli C S, Akama A, van Soesbergen A, S  n  z L. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, 2016, 351(6269): 128-129.
- [10] Antonelli A. Biogeography: drivers of bioregionalization. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 0114, doi: 10.1038/s41559-017-0114.
- [11] 郑度, 葛全胜, 张雪芹, 何凡能, 吴绍洪, 杨勤业. 中国区划工作的回顾与展望. *地理研究*, 2005, 24(3): 330-344.
- [12] 杨勤业, 吴绍洪, 郑度. 自然地域系统研究的回顾与展望. *地理研究*, 2002, 21(4): 407-417.
- [13] Turner W R, Brandon K, Brooks T M, Costanza R, da Fonseca G A B, Portela R. Global conservation of biodiversity and ecosystem services. *BioScience*, 2007, 57(10): 868-873.
- [14] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [15] Dinerstein E, Olson D, Joshi A, Vynne C, Burgess N D, Wikramanayake E, Hahn N, Palminteri S, Hedao P, Noss R, Hansen M, Locke H, Ellis E C, Jones B, Barber C V, Hayes R, Kormos C, Martin V, Crist E, Sechrest W, Price L, Baillie J E M, Weeden D, Suckling K, Davis C, Sizer N, Moore R, Thau D, Birch T, Potapov P, Turubanova S, Tyukavina A, de Souza N, Pintea L, Brito J C, Llewellyn O A, Miller A G, Patzelt A, Ghazanfar S A, Timberlake J, Kl  ser H, Shennan-Far  n Y, Kindt R, Lilles   J P B, van Breugel P, Graudal L, Voge M, Al-Shammari K F, Saleem M. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience*, 2017, 67(6): 534-545.
- [16] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global ecological zones for FAO forest reporting: 2010 update // Forest resources assessment working paper 179. Edited by. Rome: Food and Agriculture organization of the United Nations, 2012: 42.
- [17] Dokuchaev V V. On the theory of natural zones // *Sochineniya (Collected Works)*. Moscow-Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1951.
- [18] Herbertson A J. The major natural regions: an essay in systematic geography. *The Geographical Journal*, 1905, 25(3): 300-310.
- [19] K  ppen W. *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Gruyter, 1931.
- [20] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 1947, 105(2727): 367-368.
- [21] Holdridge L R. *Life Zone Ecology*. San Jose, Costa Rica: Tropical Science Center, 1967.
- [22] Dasmann R F. Towards a system for classifying natural regions of the world and their representation by national parks and reserves. *Biological Conservation*, 1972, 4(4): 247-255.
- [23] Udvardy M D F. A classification of the biogeographical provinces of the world // *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources Occasional Paper 18*. Morges, Switzerland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 1975.
- [24] Walter H, Box E. Global classification of natural terrestrial ecosystems. *Vegetatio*, 1976, 32(2): 75-81.
- [25] Bailey R G. Explanatory supplement to ecoregions map of the continents. *Environmental Conservation*, 1989, 16(4): 307-309.
- [26] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, Leemans R, Monserud R A, Solomon A M. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, 19(2): 117-134.
- [27] Schultz J. *The Ecozones of the World: The Ecological Divisions of the Geosphere*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 5-71.
- [28] Olson D M, Dinerstein E. The global 200: priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 2002, 89(2): 199-224.
- [29] Spalding M D, Fox H E, Allen G R, Davidson N, Ferda  a Z A, Finlayson M, Halpern B S, Jorge M A, Lombana A, Lourie S A, Martin K D, McManus E, Molnar J, Recchia C A, Robertson J. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, 2007, 57(7): 573-583.
- [30] Abell R, Thieme M L, Revenga C, Bryer M, Kottelat M, Bogutskaya N, Coad B, Mandrak N, Balderas S C, Bussing W, Stiassny M L J, Skelton P, Allen G R, Unmack P, Naseka A, Ng R, Sindorf N, Robertson J, Armijo E, Higgins J V, Heibel T J, Wikramanayake E, Olson D, L  pez H L, Reis R E, Lundberg J G, P  rez M H S, Petry P. Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, 2008, 58(5): 403-414.

- [31] The Nature Conservancy and World Wildlife Fund. Standards for Ecoregional Assessments and Biodiversity Visions. Arlington, VA: The Nature Conservancy, 2006.
- [32] Ellis E C, Ramankutty N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(8): 439-447.
- [33] Schneider A, Friedl M A, Potere D. Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: new methods and datasets based on 'urban ecoregions'. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1733-1746.
- [34] Bailey R G. Delineation of ecosystem regions. *Environmental Management*, 1983, 7(4): 365-373.
- [35] Bailey R G, Hogg H C. A world ecoregions map for resource reporting. *Environmental Conservation*, 1986, 13(3): 195-202.
- [36] Omernik J M, Bailey R G. Distinguishing between watersheds and ecoregions. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, 33(5): 935-949.
- [37] Rowe J S, Sheard J W. Ecological land classification: a survey approach. *Environmental Management*, 1981, 5(5): 451-464.
- [38] Klijn M, de Haes H A U. A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape Ecology*, 1994, 9(2): 89-104.
- [39] Olson D M, Dinerstein E. The global 200: a representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology*, 1998, 12(3): 502-515.
- [40] Freudenberger L, Hobson P R, Schluck M, Ibisch P L. A global map of the functionality of terrestrial ecosystems. *Ecological Complexity*, 2012, 12: 13-22.
- [41] Freudenberger L, Hobson P, Schluck M, Kreft S, Vohland K, Sommer H, Reichle S, Nowicki C, Barthlott W, Ibisch P L. Nature conservation: priority-setting needs a global change. *Biodiversity and Conservation*, 2013, 22(5): 1255-1281.
- [42] Wilson K A, McBride M F, Bode M, Possingham H P. Prioritizing global conservation efforts. *Nature*, 2006, 440(7082): 337-340.
- [43] Jenkins C N, Joppa L. Expansion of the global terrestrial protected area system. *Biological Conservation*, 2009, 142(10): 2166-2174.
- [44] Moran D, Kanemoto K. Identifying species threat hotspots from global supply chains. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 0023, doi: 10.1038/s41559-016-0023.
- [45] Kreft H, Jetz W. A framework for delineating biogeographical regions based on species distributions. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(11): 2029-2053.
- [46] Holt B G, Lessard J P, Borregaard M K, Fritz S A, Araújo M B, Dimitrov D, Fabre P H, Graham C H, Graves G R, Jønsson K A, Nogués-Bravo D, Wang Z H, Whittaker R J, Fjeldsø J, Rahbek C. An update of Wallace's zoogeographic regions of the world. *Science*, 2013, 339(6115): 74-78.
- [47] Ficetola G F, Mazel F, Thuiller W. Global determinants of zoogeographical boundaries. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 0089, doi: 10.1038/s41559-017-0089.
- [48] 欧阳志云. 中国生态功能区划. *中国勘察设计*, 2007, 1(3): 70-70.
- [49] Brandt M, Rasmussen K, Peñuelas J, Tian F, Schurgers G, Verger A, Mertz O, Palmer J R B, Fensholt R. Human population growth offsets climate-driven increase in woody vegetation in sub-Saharan Africa. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 0081, doi: 10.1038/s41559-017-0081.
- [50] 程叶青, 张平宇. 生态地理区划研究进展. *生态学报*, 2006, 26(10): 3424-3433.
- [51] 蔡佳亮, 殷贺, 黄艺. 生态功能区划理论研究进展. *生态学报*, 2010, 30(11): 3018-3027.
- [52] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 肖赓, 肖荣波, 郑华. 安徽省生态功能区划研究. *生态学报*, 2005, 25(2): 254-260.
- [53] 吴绍洪, 杨勤业, 郑度. 生态地理区域系统的比较研究. *地理学报*, 2003, 58(5): 686-694.
- [54] 高江波, 黄姣, 李双成, 蔡运龙. 中国自然地理区划研究的新进展与发展趋势. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1400-1407.
- [55] 谢高地, 张昌顺, 张林波, 苏德, 曹淑艳, 冷允法, 肖玉. 保持县域边界完整性的中国生态区划方案. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 154-162.
- [56] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.