

青藏高原维管植物物种丰富度分布的情景模拟

范泽孟¹, 黄 言^{1,2}, 岳天祥¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 如何充分利用离散的观测数据, 通过对维管植物物种分布丰富度及其与生境因子之间的相互作用和影响机理的定量分析, 实现维管植物物种丰富度的空间分布及其情景模拟, 是目前生物多样性研究前沿和核心内容之一。针对这一问题, 在实现青藏高原37个国家自然保护区的维管植物物种数量收集和边界数据矢量化量的基础上, 分别进行维管植物物种数量与土地覆盖类型、环境因子和景观生态指数等三大类生境因子之间的相关关系的定量计算和对比分析, 筛选和确定最佳相关分析方程, 进而构建青藏高原维管植物物种丰富度的空间模拟分析模型。该模型中, 维管植物物种丰富度与生境因子之间的复相关系数为0.94, 模型验证结果表明, 青藏高原的维管植物物种的平均丰富度为496.79种/100 km², 其空间分布格局整体上呈东南向西北逐渐减少趋势; 另外, 除柴达木盆地荒漠区域以外, 维管植物物种的空间分布随海拔的升高而减少。基于CMIP5 RCP 2.6、RCP 4.5和RCP 8.5三种气候情景模拟获得的青藏高原维管植物物种丰富度未来情景结果显示, 在T0-T4(2010-2100)时段内, 青藏高原维管植物物种丰富度整体将呈减少趋势。RCP 8.5情景下青藏高原维管植物物种丰富度的变化幅度最大, 而RCP 2.6情景下的维管植物物种丰富度的变化幅度最小。研究表明, 本文构建的模型能够对青藏高原维管植物物种丰富度的空间分布格局及其未来情景进行模拟分析, 模拟结果可为青藏高原生物多样性及其对气候变化响应的综合评估和情景模拟提供方法和技术支持。

关键词: 青藏高原; 维管植物物种丰富度; 空间分析模型; 情景分析

DOI: 10.11821/dlxb201801014

1 引言

维管植物物种类型的空间分布是气候因子、环境因子、地形地貌、土壤等长期相互作用的结果。维管植物通过截留水分与养分循环来影响水土保持以及地表元素循环, 并在气候和大气的相互关系中起到重要作用^[1-3]。由于维管植物能够为其他物种提供生存所必需的物质和能量, 其丰富度的空间分布在一定程度上决定了其他物种的多样性与生态系统结构及分布状况^[4]。

如何对维管植物物种丰富度的空间分布格局进行模拟分析, 尤其是如何根据各种影响因子指标, 定量分析和揭示维管植物物种丰富度的空间格局变化, 已逐渐成为生物多样性研究的重点和难点^[4-5]。近几十年来, 国内外关于维管植物空间分布与气候关系开展

收稿日期: 2017-01-09; 修订日期: 2017-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271406); 国家重点研发计划项目(2017YFA0603702); 国家自然科学基金重点项目(91325204, 91325304); 资源与环境信息系统国家重点实验室自主部署创新研究计划项目(088RA600YA)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271406; National Key R&D Program of China, No. 2017YFA0603702; National Natural Science Foundation of China, NO.91325204, No. 91325304); Innovation Project of LREIS (O88RA600YA)

作者简介: 范泽孟(1977-), 男, 云南镇雄人, 博士, 副研究员, 研究方向为: 气候变化与生态系统响应、生态模型与系统模拟、土地覆盖情景预测及生物多样性模拟。E-mail: fanzm@lreis.ac.cn

了大量研究^[6]。譬如, Stephenson、Gavilan等的研究表明在气候因子中, 温度变化和降水是影响维管植物物种类型及其分布的主要影响因子^[7-9]。土地覆盖作为全球变化的主要载体, 直接影响地球系统的生物多样性^[10-12], 对陆地生态系统来说, 土地覆盖变化已成为致使物种多样性丧失、改变维管植物物种丰富度空间分布格局的主要驱动因子之一^[13-14]。Zerger等构建GAM模型, 对澳大利亚新南威尔士西部2600 km²范围内的植被分布进行了空间模拟^[15]; Song等利用BIOME 4模型对青藏高原的植被类型的地理分布进行了模拟^[16]; 沈泽昊等将基于样本调查数据的群落—生境因子回归分析与GIS方法支持下的植被空间格局预测结合起来, 构造出广泛适用的植被类型丰富度分布预测模型^[17]。

青藏高原独特的自然环境格局为不同生物区系的相互交汇与融合提供了特定的空间, 使青藏高原成为全球生物多样性保护的25个热点地区之一^[18-20]。基于遥感和GIS方法技术, 在青藏高原植被空间分布变化及其生态环境要素效应方面开展了大量的研究工作。譬如, Zhang等^[18]基于大尺度采样对比方法, 对青藏高原自然保护区的净初级生产力(NPP)的变化进行了定量评估与分析; 卓嘎等利用遥感数据实现了2000-2007西藏地区植被的空间分布与变化趋势^[21]; 廖清飞等定量估算了2000-2009年青海省东部研究区的植被覆盖度, 并结合高程数据分析了与地形因子的关系^[22]; Zhong等利用1998-2006年SPOT植被数据研究了青藏高原植被变化, 并发现了青藏高原植被与站点处观测的气象指标具有很强的相关关系^[23]; Zhang对2000-2009年青海西藏两省植被的变化进行研究, 发现植被具有增长的趋势^[24]; Zhou等研究了1982-2002年青藏高原年际植被的变化规律, 并分析了与气象因子的关系, 发现青藏高原植被以波动的方式增强的现象^[25]; Piao等研究了1982-2006年青海西藏地区春季植被的生长变化, 发现1999年之前植被表现为增长趋势, 而该年之后出现延迟现象^[26]; 王青霞等以多种统计方法为基础, 探讨了青藏高原不同时间尺度的植被变化的时空特征及其与气候因子的关系^[27]; 刘军会等研究了1981-2005年青藏高原植被覆盖变化与气候变化的关系, 发现25年间青藏高原温度升高、降水量增加, 植被覆盖度呈“整体升高、局部退化”的趋势^[28]。

以上研究主要集中在对青藏高原植被类型及土地覆盖变化方面, 多样性研究也主要是利用采样数据对局地格局上的物种多样性的空间统计和分析。而如何对观测数据进行拓展, 进而模拟整个青藏高原的维管植物物种丰富度的研究缺乏^[5, 29-30]。因此, 本文以位于青藏高原的37个国家级自然保护区的维管植物物种数据作为采样数据, 结合土地覆盖类型、气候要素(年均生物温度与年均降雨量)、地形要素以及生态景观多样性指数(景观生态多样性指数与景观斑块连通性指数)等因子, 构建青藏高原维管植物物种丰富度的空间分析模型, 实现对整个青藏高原维管植物物种丰富度时空变化的模拟分析。

2 数据与模型方法

2.1 数据采集与处理

运用全国2010年(T0)土地覆被空间分布数据为土地覆盖现状数据^[31]。土地覆盖情景数据运用根据CMIP 5的RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5情景未来气候数据模拟获得的2040年(T1)、2070年(T2)和2100年(T3)三个时段的1 km×1 km全国土地覆盖数据^[32-37]。气候数据为运用高精度高速度曲面建模方法(HASM)模拟获得的1 km×1 km分辨率的空间气候数据。具体包括1981年-2010年的全国30年平均生物温度和平均降水量空间分布数据, CMIP 5的RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5情景下T1到T3各时间段的全国平均生物温度和平均降水量空间分布未来情景栅格数据^[34, 38-42]。维管植物物种数据为国家环保部

官网 (<http://www.zhb.gov.cn/stbh/zrbhq/>) 公布的 37 个位于青藏高原的国家级自然保护区维管植物物种的调查统计数据 (表 1)。其中, 青藏高原面积及范围^[43]数据来源于全球变化科学研究数据出版系统^[44] (<http://www.geodoi.ac.cn/doi.aspx?doi=10.3974/geodb.2014.01.12.v1>)。而保护区的边界数据, 则是根据从环保部、林业局、国家测绘局和国家基础地理信息中心等数据来源收集到的基础资料, 以及部分高分辨率遥感影像数据, 利用 ArcGIS 软件矢量化获得^[45-46] (图 1)。DEM 的基础数据来源于美国 NASA 在网站

表 1 青藏高原国家级自然保护区维管植物物种数据
Tab. 1 Vascular plant types of national nature reserves on Qinghai-Tibet Plateau

保护区类型	保护区名称	维管植物物种数	保护区类型	保护区名称	维管植物物种数
内陆湿地	黄河首曲湿地自然保护区	200	野生动物	九顶山自然保护区	1790
	若尔盖自然保护区	433		芒康滇金丝猴自然保护区	318
	三江源自然保护区	1736		小金四姑娘山自然保护区	1200
森林生态	拉鲁湿地自然保护区	433	荒漠生态	雅鲁藏布大峡谷自然保护区	3768
	海子山自然保护区	1027		类乌齐马鹿自然保护区	318
	祁连山自然保护区	1156		盐池湾自然保护区	277
	大通北川河源区自然保护区	612		雅鲁藏布江中游河谷黑颈鹤自	891
	龙溪—虹口自然保护区	2500		卧龙自然保护区	1815
	亚丁自然保护区	943		尕斯库勒湖自然保护区	529
	连城自然保护区	742		青海湖自然保护区	445
	珠穆朗玛峰自然保护区	1785		可可西里自然保护区	202
	察隅慈巴沟自然保护区	1392		隆宝自然保护区	30
	贡嘎山自然保护区	3634		长沙贡玛自然保护区	433
	莲花山自然保护区	670		小寨子沟自然保护区	1600
	循化孟达自然保护区	506		色林错自然保护区	700
	白马雪山自然保护区	1747		阿尔金山自然保护区	330
	高黎贡山自然保护区	4303		羌塘自然保护区	470
	洮河自然保护区	433		柴达木梭梭林自然保护区	158
	太子山自然保护区	838			

和 (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) 公布的 SRTM 数据, 其分辨率为 1 km×1 km。

2.2 模型参数与方法选取

在对国家自然保护区的维管植物物种数量、土地覆盖及其他环境因子分析的过程中发现, 自然保护区土地覆盖动态变化强度低于非保护区^[45], 而且自然保护区的维管植物物种丰富度的空间分布与自然保护区内特定环境因子、土地覆盖类型及其结构指数具有很好的相关性特征。基于这一分析结论, 以青藏高原国家自然保护区的维管植物物种数据作为基准模拟情况和样本数据, 并充分利用现有自然保护区的维管植物物种调研、观测和统计数据, 对青藏高原维管

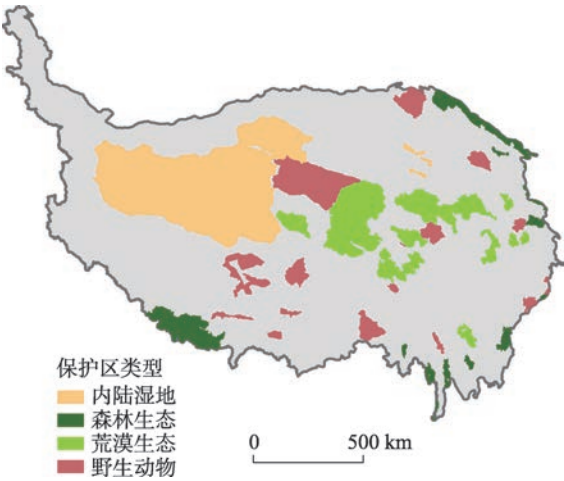


图 1 青藏高原国家级自然保护区空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of national nature reserves on Qinghai-Tibet Plateau

植物物种丰富度的空间模拟方法。在模型构建的过程中, 针对目前大多数物种多样性的空间分析方法主要对土地覆盖类型和环境因子的单一层面的空间相关分析局限性, 除了将土地覆盖类型和环境因子同时考虑以外, 还引入景观多样性指数, 从而对维管植物物种丰富度空间分布影响与驱动的机理进行空间相关分析。

(1) 运用 GIS 空间分析方法, 实现每一种土地覆盖类型 (包括: 耕地、林地、草地、湿地、建设用地、荒漠、冰雪) 的面积及其比例。

(2) 选择年平均生物温度^[46]、年平均降雨量^[47]、地形起伏度^[48]三个变量作为环境因子对维管植物物种丰富度影响的空间相关分析参数, 计算公式可分别表征为以下方程:

$$MAB(x, y) = \frac{1}{365} \sum_{j=1}^{365} TEM_{>0}(j, x, y, t) \quad (1)$$

$$TAP(x, y) = \frac{1}{365} \sum_{j=1}^{365} P(j, x, y) \quad (2)$$

$$Re = \frac{A'}{A} \quad (3)$$

式中: $MAB(x, y)$ 为 (x, y) 位置处的年平均生物温度; $TEM_{>0}(j, x, y, t)$ 是 (x, y) 位置处一年中第 j 天气温大于 0°C 的小时总数除以 24, 即每天 24 小时内大于 0°C 的积温; $TAP(x, y)$ 为 (x, y) 位置处的年平均降水量; $P(j, x, y)$ 是 (x, y) 位置处一年中第 j 天的平均降水量; Re 为地形粗糙度; A' 为真实地形之表面的面积; A 为地形投影在平面上的面积。

(3) 选取土地覆盖生态多样性指数^[49]和土地覆盖斑块连通性指数^[50-52]两个景观多样性指数作为分析维管植物物种丰富度与景观多样性空间相关关系的变量, 计算公式分别为:

$$D(t) = \frac{\ln(\sum_{i=1}^{m(\epsilon)} (p_i(t))^{\frac{1}{2}})^2}{\ln(\epsilon)} \quad (4)$$

$$CO(t) = \sum_{i=1}^{m(t)} \sum_{j=1}^{n(t)} P_{ij}(t) S_{ij}(t) \quad (5)$$

$$\text{其中, } S_{ij}(t) = \frac{8\sqrt{3}A_{ij}(t)}{(pr_{ij}(t))^2}$$

式中: $D(t)$ 为土地覆盖景观多样性指数; $p_i(t)$ 为第 i 种土地覆盖类型面积的概率, 即其占总研究区域土地覆盖面积的比例; $m(\epsilon)$ 为土地覆盖类型总数目, $\epsilon = (e+a)^{-1}$ 为观测尺度; a 为土地覆盖的总面积; $e=2.71828$; t 为时间变量。 $CO(t)$ 为土地覆盖斑块连通性指数; $A_{ij}(t)$ 、 $Pr_{ij}(t)$ 分别为第 i 种土地覆盖类型第 j 个斑块的面积和周长; t 为时间变量; $8\sqrt{3}$ 是正六边形周长的平方与其面积的比值; $m(t)$ 为土地覆盖类型种数; $n(t)$ 为某种土地覆盖类型的斑块数; $P_{ij}(t)$ 为第 i 种土地覆盖类型的第 j 个斑块的面积占研究区域总面积的比率。

(4) 在分别获取位于青藏高原 37 个国家级自然保护区的维管植物物种丰富度 (用每平方公里上分布的维管植物物种数量表示)、土地覆盖类型、平均生物温度、平均降水和景观多样性指数的基础上, 分别对各类因子与维管植物物种丰富度的相关关系进行多种相关分析, 并最终选取最优回归模式及方程参与模拟。在目前的种面积曲线及其他物种丰富度模型中, 线性回归和非线性回归模型均有采用, 但究竟哪种模型更加适合则一直具有争议。

因此, 本文分别选用线性模型表达式形式为 $y=A+Bx$ 、非线性模型表达式形式主要有对数模型 $y=A+B\ln x$ 、指数模型 $y=A+Be^x$, 其中 y 代表维管植物物种丰富度, x 代表影响因子, A 、 B 为参数。并采用位于青藏高原的 37 个国家级自然保护区的维管植物物种数为样本数据, 进行上述三种形式的回归分析, 获得如表 2 所示的各类因子与维管植物物种丰

表 2 维管植物物种丰富度与各影响因子回归分析
Tab. 2 The regression equation between vascular plant abundance and driving factors

因子类型	模型类型	模型	相关系数
环境因子	线性模型	$y = 259.79 + 120.06MAB - 0.31MAP + 3179.40Re$	$R = 0.85$
	指数对数混合模型	$y = -756.85 + 0.20 \exp(MAB) - 118.68 \ln MAP + 1950.94 \exp(Re)$	$R = 0.91$
	对数模型	$y = -2789.60 - 25.10 \ln MAB - 665.62 \ln MAP + 395.03 \ln Re$	$R = 0.68$
	景观多样性指数因子		
景观多样性指数因子	线性模型	$y = 1217.50 - 1643.47Cot + 3245.51Dt$	$R = 0.31$
	指数模型	$y = -541.70 - 1547.10 \exp(Cot) + 3301.28 \exp(Dt)$	$R = 0.52$
	对数模型	$y = 1109.06 + 12.06 \ln Cot - 38.37 \ln Dt$	$R = 0.20$
土地覆盖类型因子	线性模型	$y = 881.86 + 2.94 \times 10^{-6} Fa + 7.30 \times 10^{-7} Fo + 1.85 \times 10^{-9} Gr - 7.88 \times 10^{-9} Wa - 1.61 \times 10^{-4} Bu - 2.17 \times 10^{-8} De - 6.47 \times 10^{-8} Ic$	$R = 0.65$
	对数模型	$y = 388.46 + 39.83 \ln Fa + 57.89 \ln Fo - 7.48 \ln Gr - 62.01 \ln Wa - 19.96 \ln Bu + 2.84 \ln De + 44.84 \ln Ic$	$R = 0.80$

注: y 代表维管植物物种丰富度; MAB 、 MAP 、 Re 分别代表年平均生物温度、年平均降雨量、地形起伏度; Cot 、 Dt 分别代表土地覆盖生态多样性指数、土地覆盖斑块连通性指数; Fa 、 Fo 、 Gr 、 Wa 、 Bu 、 De 、 Ic 分别代表耕地、林地、草地、湿地、建设用地、荒漠、冰雪7种土地覆盖类型的面积; R 为相关系数。

度的回归方程和回归系数。

对表2分析发现,对于环境因子与维管植物物种丰富度相关性来说,指数对数混合模型($R = 0.91$)模型优于简单的线性模型($R = 0.85$)和对数模型($R = 0.68$);对于景观生态多样性指数因子与维管植物物种丰富度相关关系,则指数模型($R = 0.52$)优于线性模型($R = 0.31$)和对数模型($R = 0.20$);而对于土地覆盖类型因子与维管植物物种丰富度相关性,则是对数模型($R = 0.80$)拟合方程效果最好。

2.3 青藏高原维管植物物种丰富度空间分析模型

根据维管植物物种丰富度与各种影响因子的回归模型分析结果,在构建维管植物物种丰富度空间模拟分析模型的过程中,对土地覆盖类型因子、环境因子和景观多样性指数3类因子与维管植物物种丰富度相关分析,分别采用对数模型、指数对数混合模型和指数模型的3个拟合方程,进而构建涵盖土地覆盖类型因子、环境因子、景观多样性指数因子三大类因子的青藏高原维管植物物种丰富度空间分析模型,模型的理论公式为:

$$VPA(x,y)_t = Cons + \omega_1 \left[\begin{matrix} \alpha_1 \ln Fa(x,y)_t \\ + \alpha_2 \ln Fo(x,y)_t \\ + \alpha_3 \ln Gr(x,y)_t \\ + \alpha_4 \ln Wa(x,y)_t \\ + \alpha_5 \ln Bu(x,y)_t \\ + \alpha_6 \ln De(x,y)_t \\ + \alpha_7 \ln Ic(x,y)_t \end{matrix} \right] + \omega_2 \left\{ \begin{matrix} \beta_1 \exp[MAB(x,y)_t] \\ + \beta_2 \ln MAP(x,y)_t \\ + \beta_3 \exp[Re(x,y)_t] \end{matrix} \right\} + \omega_3 \left\{ \begin{matrix} \gamma_1 \exp[Cot(x,y)_t] \\ + \gamma_2 \exp[Dt(x,y)_t] \end{matrix} \right\} \quad (6)$$

式中: t 为时间; (x, y) 为位置坐标; $Cons$ 为常数; ω 为模型系数; $VPA(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处维管植物物种丰富度; $MAB(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处年平均生物温度自变量; $MAP(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处年平均降水量自变量; $Re(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处平均地形起伏度自变量; $Cot(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处土地覆盖斑块连通性指数自变量; $Dt(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处土地覆盖生态多样性指数自变量; $Fa(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处耕地土地覆盖类型面积自变量; $Fo(x, y)_t$ 为 t 时段 (x, y) 位置处林地土地覆盖类型面积自变量;

$Gr(x, y)$ 为 t 时段 (x, y) 位置处草地土地覆盖类型面积自变量; $Wa(x, y)$ 为 t 时段 (x, y) 位置处水域土地覆盖类型面积自变量; $Bu(x, y)$ 为 t 时段 (x, y) 位置处建设用地土地覆盖类型面积自变量; $De(x, y)$ 为 t 时段 (x, y) 位置处荒漠土地覆盖类型面积自变量; $Ic(x, y)$ 为 t 时段 (x, y) 位置处冰雪土地覆盖类型面积自变量; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$ 分别为各土地覆盖类型因子与维管植物物种丰富度的模型系数; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别为平均年生物温度、平均年降水量、地形起伏度与维管植物物种丰富度的模型系数; γ_1, γ_2 分别为土地覆盖生态多样性指数、土地覆盖斑块连通性指数与维管植物类型丰富度的模型系数。

运用青藏高原 35 个国家级自然保护区公布的表 1 的维管植物物种数据进行方程拟合获得方程 (6) 中各个参数变量系数为: $Cons = -11582.89$, $\omega_1 = 0.38$, $\omega_2 = 0.98$, $\omega_3 = 1.02$, $\alpha_1 = 66.08$, $\alpha_2 = 0.68$, $\alpha_3 = 2.40$, $\alpha_4 = -34.22$, $\alpha_5 = 4.04$, $\alpha_6 = 31.63$, $\alpha_7 = 56.00$, $\beta_1 = 0.23$, $\beta_2 = 536.45$, $\beta_3 = 1400.28$, $\gamma_1 = -283.11$, $\gamma_2 = 6007.68$ 。方程 (6) 的复相关系数 $R = 0.94$, 并通过 0.01 的显著性检验。在构建该模型的基础上, 分别对青藏高原维管植物物种丰富度的空间分布现状及未来情景进行了模拟分析。

2.4 模型验证

利用青藏高原 37 个国家级自然保护区的维管植物物种数据和 2000 年的土地覆盖现状数据, 运行青藏高原维管植物物种丰富度空间分析模拟模型获得青藏高原维管植物物种丰富度的空间分布数据。并求算每一个自然保护区的维管植物物种丰富度, 即每平方公里上的维管植物物种数。在模型验证的过程中, 将每平方公里上维管植物物种丰富度模拟值与调研统计值之间的误差来进行验证, 误差的计算公式如下:

$$S_{\text{Error}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Value_{is} - Value_{it}|}{S_i} \right) \quad (7)$$

式中: S_{Error} 为该模型下维管植物物种丰富度的模拟误差; n 为自然保护区个数; S_i 为第 i 个自然保护区的面积 (km^2); $Value_{is}$ 为第 i 个国家自然保护区在该模型模拟下的维管植物物种丰富度模拟值; $Value_{it}$ 为第 i 个国家自然保护区维管植物物种丰富度的调研统计值。

误差分析结果显示, 青藏高原 37 个国家级自然保护区维管植物物种丰富度空间分布的模型模拟的总体误差 2.21 种/ km^2 。该分析表明, 以上分析表明, 基于土地覆盖类型因子、环境因子和景观指数因子三大类因子综合考虑所构建维管植物物种丰富度空间分析模型的模拟结果与研究区的维管植物物种数的实际情况比较一致, 可以适用于区域维管植物物种丰富度的空间分布格局模拟。

2.5 情景设计

情景设计是对模型输入因子在未来发展中可能趋势的设计和分析, 不同情景的假设条件, 将使得模型模拟未来变化呈现不同的趋势和可能性。在对 IPCC 第五次评估报告 CMIP 5 的各种气候情景进行分析的基础上, 分别选择能够反映未来气候变化的低、中、高三种气候情景 (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5), 其中, RCP 2.6 是低端路径排放情景, RCP 4.5 为中间稳定路径排放情景, RCP 8.5 为高基线排放情景^[52]。IPCC CMIP 5 的各个 RCP 气候情景数据在中国区域的高精度降尺度分析表明, RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5 三种情景的气候数据能够较好反映中国区域未来气候变化情况^[38]。

在对青藏高原维管植物物种丰富度未来情景进行预测模拟的过程中, 采用基于 RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5 三种情景的气候数据, 运用高精度曲面建模方法获得的青藏高原区域的气候数据^[38], 以及土地覆盖情景模型模拟获得的青藏高原土地覆盖未来情景数据^[53], 运用构建的青藏高原维管植物物种丰富度空间分析模型, 分别实现 RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5 三种情景驱动下的青藏高原维管植物物种丰富度未来情景模拟。

3 结果分析

3.1 青藏高原维管植物物种丰富度的空间分布格局

根据青藏高原维管植物物种丰富度空间分布格局模拟结果(图2)分析发现,青藏高原的维管植物物种的平均丰富度为496.79种/100 km²,其空间分布格局整体上呈东南向西北逐渐减少趋势,其中青藏高原中西部的藏北高原和柴达木盆地荒漠上的维管植物物种丰富度分布相对较低,平均维管植物物种丰富度小于200种/100 km²,而青藏高原东北部西秦岭与祁连山过渡区域、东部的岷山—邛崃山—大雪山区域、东南部的高黎贡山—怒山和玉龙山区域的维管植物物种丰富度相对较高,平均维管植物物种丰富度大于600种/100 km²。尤其是在白龙江、大渡河、金沙江、澜沧江、怒江以及雅鲁藏布江等流域一带的维管植物物种丰富度可达1000种/100 km²以上,甚至其局部区域的维管植物物种丰富度超过2000种/100 km²。

3.2 维管植物类型丰富度的情景分析

对基于CMIP5 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5三种气候情景模拟获得的青藏高原维管植物物种丰富度的空间栅格数据进行制图(图2~图5)和空间统计分析(表3),分别获得三种情景下青藏高原的维管植物物种丰富度的时空变化趋势。

基于RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5三种未来情景下的青藏高原维管植物物种丰富度模拟结果显示,在T0-T4时段内,青藏高原维管植物物种丰富度整体将呈减少趋势。其中,RCP 2.6情景将呈持续减少趋势,但减少速率逐渐减小,T0-T1、T1-T2、T2-T3三个时段内平均每百平方公里分别减少0.11%、0.03%和0.04%;RCP 4.5情景下,T0-T1时段的维管植物物种丰富度呈增加趋势,平均每百平方公里增加0.05%,而T1-T2和T2-T3两个时段呈减少趋势,平均每百平方公里分别减少0.29%和0.21%;RCP 8.5情景下,T0-T1时段的维管植物物种丰富度也将呈增加趋势,平均每百平方公里增加0.10%,而T1-T2和T2-T3两个时段呈减少趋势,平均每百平方公里分别减少0.39%和0.84%。三种情景总体情况看,RCP 8.5情景下青藏高原维管植物物种丰富度的变化幅度最大,而RCP 2.6情景下的维管植物物种丰富度的变化幅度最小,RCP 4.5情景下的维管植物物种丰富度变化则区域前两种情景之间。

4 结论与讨论

目前国内外对维管植物物种丰富度空间分布研究,主要集中于局地区域或者以行政单元边界为基础的观测和统计分析研究,很少涉及到中宏观尺度上的空间格局模拟,尤其是维管植物物种丰富度空间分布格局未来情景的模拟和预测分析。另外,传统相关模型中主要针对单一驱动因子进行分析(譬如种—面积曲线方法),即使进行多驱动影响因子的综合分析过程中,也主要考虑环境因子和土地覆盖因子,而未考虑到生态景观复杂度对维管植物丰富度变化影响的驱动作用。针对以上两方面现有模型的局限性,在维管植物物种丰富度空间分析模型构建的过程中,将其驱动因子概括为土地覆盖类型因子、环境因子和景观生态多样性指数因子三大类。在以青藏高原37个国家自然保护区的数据为基础,利用线性回归模型和非线性回归模型(包括对数模型、指数模型和对数指数混合模型),在分别测试青藏高原维管植物物种丰富度空间分布与三类因子之间的相关性定量分析的基础上,分别采用对数模型、指数对数混合模型和指数模型的3个拟合方程,进而构建了涵盖土地覆盖类型因子、环境因子、生态景观多样性指数因子三大类因子的

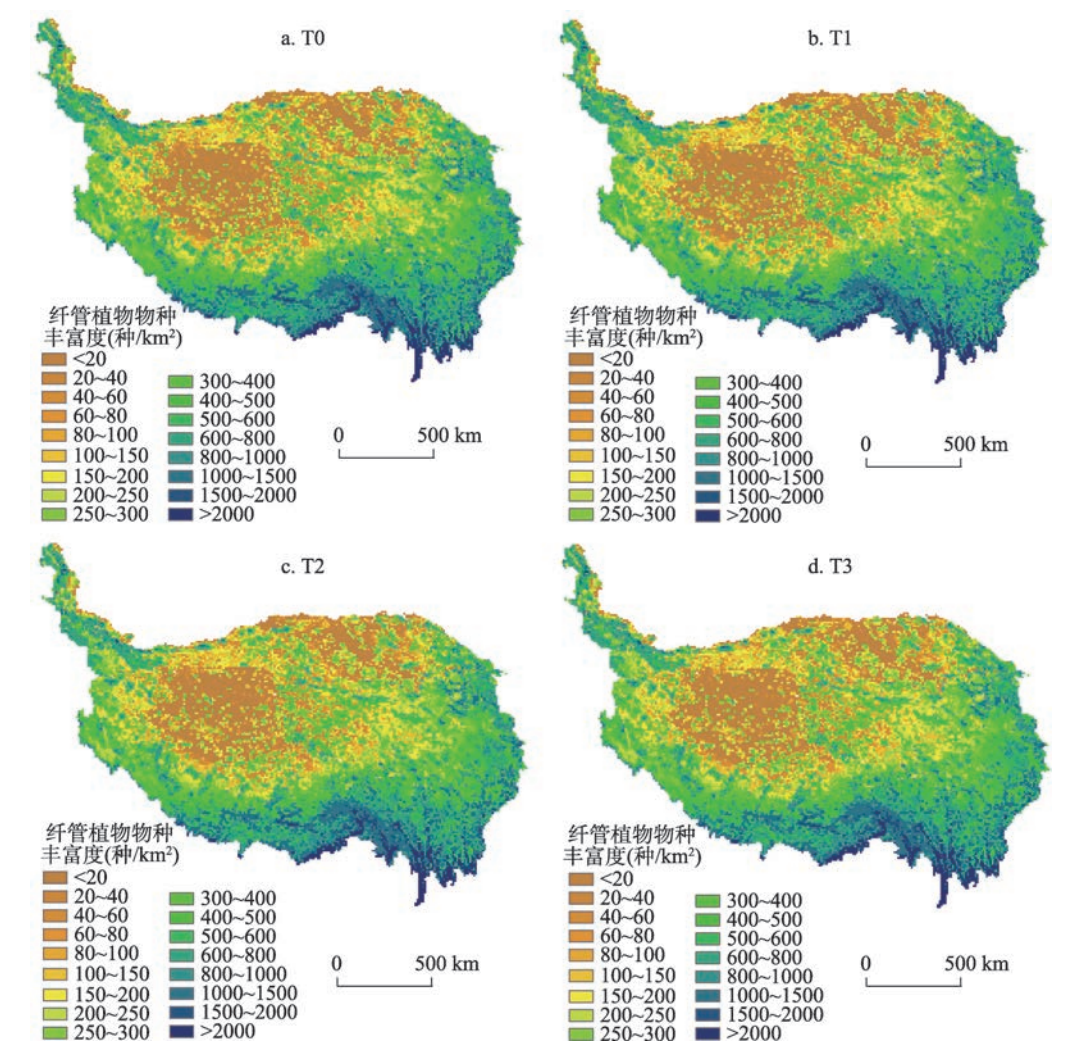


图2 基于RCP 2.6情景的青藏高原维管植物物种丰富度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of vascular plant species abundance on Qinghai-Tibet Plateau under RCP2.6 scenario

表3 三种情景下的青藏高原维管植物物种丰富度变化(种)

Changes of vascular plant species abundance on Qinghai-Tibet Plateau under future three scenarios							
情景	T0	$\Delta(T1-T0)$	T1	$\Delta(T1-T0)$	T2	$\Delta(T1-T0)$	T3
RCP 2.6	496.79	-0.53	496.26	-0.17	496.09	-0.04	496.05
RCP 4.5	496.79	0.27	497.06	-1.42	495.64	-1.05	494.59
RCP 8.5	496.79	0.52	497.31	-1.95	495.36	-4.15	491.21

青藏高原管维管植物物种丰富度空间分析模型。

模型检验显示，藏高原管维管植物物种丰富度与三大类因子之间的复相关性为0.84，且通过了 $P = 0.01$ 的相关显著性检验。模拟结果显示，青藏高原的维管植物物种的平均丰富度为496.79种/100 km²。其空间分布格局，一方面整体上呈东南向西北逐渐减少趋势；另一方面，除柴达木盆地荒漠区域外，青藏高原其余区域的维管植物物种丰富度具有随海拔升高而减少的趋势。另外，基于RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5三种未来情景下的青藏高原维管植物物种丰富度模拟结果显示，在T0-T4时段内，青藏高原维管植物

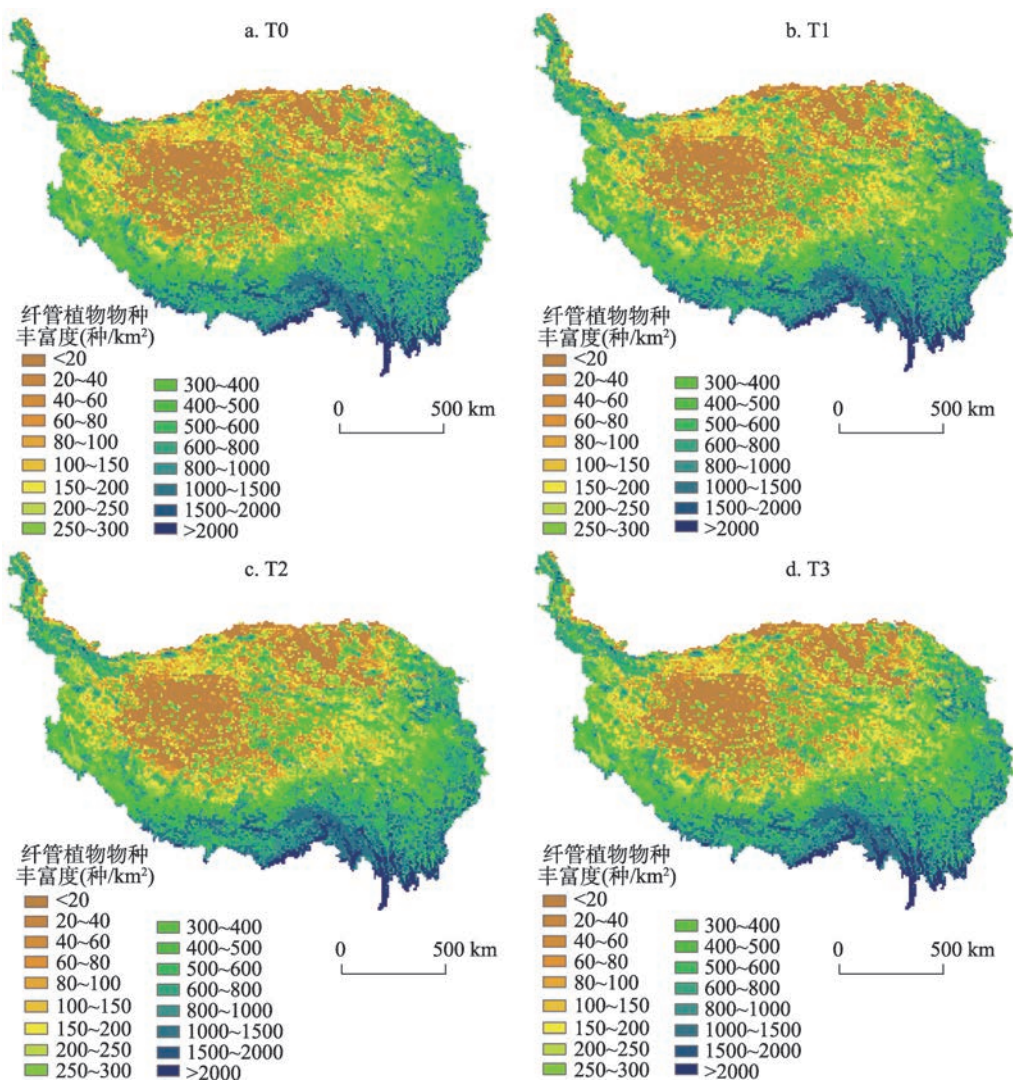


图3 基于RCP 4.5情景下的青藏高原维管植物物种丰富度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of vascular plant species abundance on Qinghai-Tibetan Plateau under RCP4.5 scenario

物种丰富度整体将呈减少趋势。其中，RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5 三种未来情景下的青藏高原维管植物物种丰富度的变化幅度依次呈递增趋势。

将模型模拟的青藏高原维管植物物种丰富度空间分布数据与环保部以县域为基本单元的全国生物多样性本底调查结果^[54]进行对比分析发现，模型模拟青藏高原维管植物物种丰富度的空间分布与本底调查评估结果的空间分布格局一致，表明本文构建的青藏高原维管植物物种丰富度空间分析模型，能够整体上模拟青藏高原维管植物物种丰富度的空间分布格局及其变化状况。模型构建过程中，不仅将土地覆盖类型和环境因子共同考虑，而且将生态景观指数也加以考虑，改进了目前相关的模型仅考虑物种与土地覆盖面积、类型以及环境因子的缺陷。模型不仅能够在中宏观尺度上模拟维管植物物种丰富度的空间分布格局，而且能够根据对未来不同情景下的维管植物物种丰富度进行预测和模拟分析。模拟预测结果可以为生态系统服务管理及生物多样性变化对全球变化的适应性分析提供方法和数据支持。

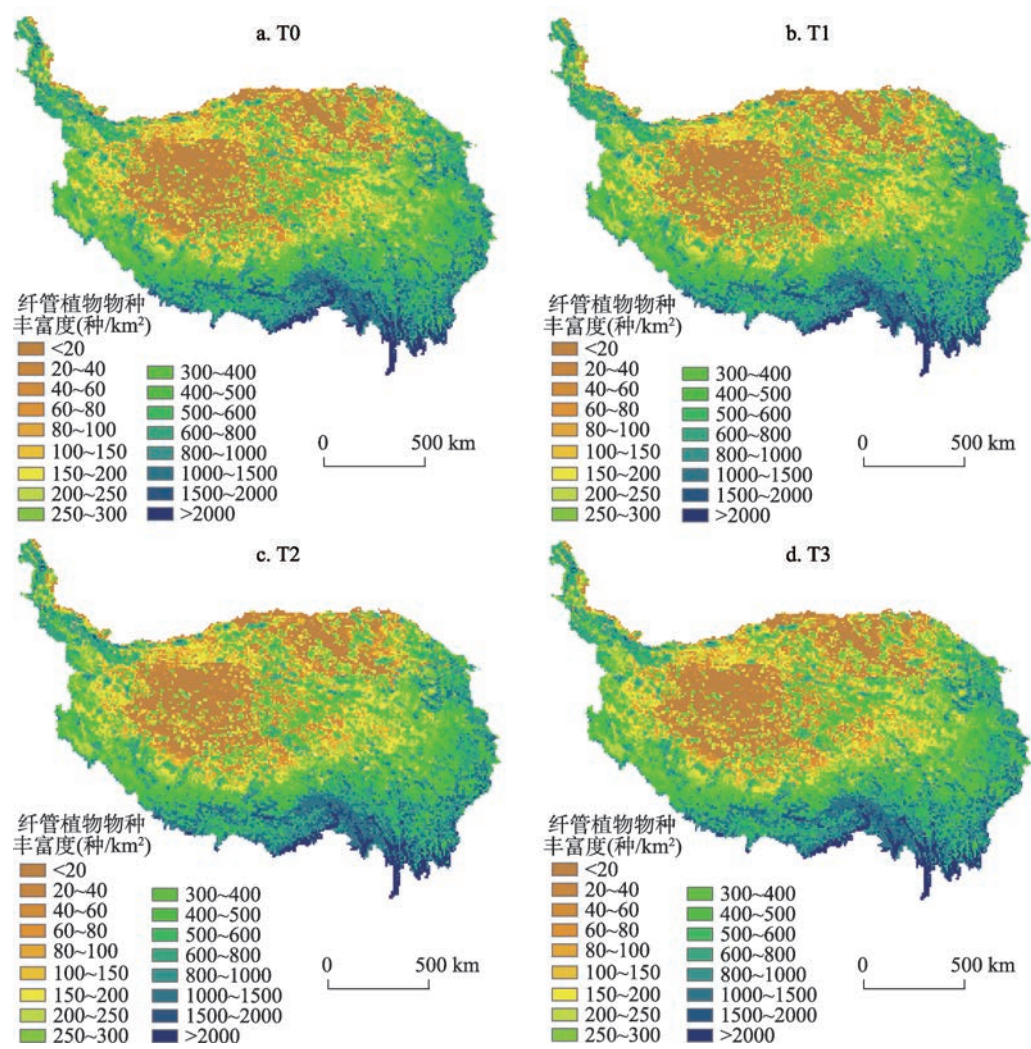


图4 基于RCP 8.5情景下的青藏高原维管植物物种丰富度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of vascular plant species abundance on Qinghai-Tibetan Plateau under RCP8.5 scenario

目前由于青藏高原维管植物物种基础数据获取的困难性，只考虑位于青藏高原的37个国家级自然保护区公布的维管植物物种数据作为样本数据，以后的工作中，将通过高分辨率的遥感数据和大量实地样本采样数据收集，从而使模拟结果更加接近与青藏高原维管植物物种的客观分布状况。

参考文献(References)

[1] Yue T X, Fan Z M, Chen C F, et al. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2342-2361.

[2] Godínez-Alvarez H, Herrick J E, Mattocks M, et al. Comparison of three vegetation monitoring methods: their relative utility for ecological assessment and monitoring. *Ecological Indicators*, 2009, 9(5): 1001-1008.

[3] Pielke R A, Avissar R, Raupach M, et al. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: Influence on weather and climate. *Global Change Biology*, 1998, 4(5): 461-475.

[4] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 220-227.

[5] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global Consequences of Land Use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.

- [6] Zhou G S, Zhang X S. Study on Chinese climate-vegetation relationship. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(2): 113-119.
- [7] Gavilán R G. The use of climatic parameters and indices in vegetation distribution. A case study in the Spanish Sistema Central. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 50(2): 111-120.
- [8] Graham R W, Grimm E C. Effects of global climate change on the patterns of terrestrial biological communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 1990, 5(9): 289-292.
- [9] Stephenson N L. Climatic control of vegetation distribution: The role of the water balance. *American Naturalist*, 1990, 135(5): 649-670.
- [10] Rounsevell M D A, Reay D S. Land use and climate change in the UK. *Land Use Policy*, 2009, 26(1): S160-S169.
- [11] Turner B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [12] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531.
- [13] Moreira F, Silva J P, Estanque B, et al. Mosaic-level inference of the impact of land cover changes in agricultural landscapes on biodiversity: A case-study with a threatened grassland bird. *PloS One*, 2012, 7(6): 38876.
- [14] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [15] Zerger A, Gibbons P, Seddon J, et al. A method for predicting native vegetation condition at regional scales. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 91(2): 65-77.
- [16] Song M H, Zhou C P, Ouyang H. Simulated distribution of vegetation types in response to climate change on the Tibetan Plateau. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16(3): 341-350.
- [17] Shen Zehao, Zhao Jun. Prediction of the spatial patterns of species richness based on the plant topography relationship: An application of GAMs approach. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 27(3): 953-963. [沈泽昊, 赵俊. 基于维管植物-地形关系的物种丰富度空间格局预测: GAMs 途径的一种应用. *生态学报*, 2007, 27(3): 953-963.]
- [18] Zhang Y L, Hu Z J, Qi W, et al. Assessment of effectiveness of nature reserves on the Tibetan Plateau based on net primary production and the large sample comparison method. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1): 27-44.
- [19] Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12. [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.]
- [20] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [21] Zhuo Ga, Li Xin, Luo Bu, et al. Dynamical analysis of recent vegetation variation with satellite dataset in Tibet Region. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(3): 563-571. [卓嘎, 李欣, 罗布, 等. 西藏地区近期植被变化的遥感分析. *高原气象*, 2010, 29(3): 563-571.]
- [22] Liao Qingfei, Zhang Xin, Ma Quanning, et al. Spatiotemporal variation of fractional vegetation cover and remote sensing monitoring in the eastern agricultural region of Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5936-5943. [廖清飞, 张鑫, 马全青, 等. 青海省东部农业区植被覆盖时空演变遥感监测与分析. *生态学报*, 2014, 34(20): 5936-5943.]
- [23] Zhong L, Ma Y M, Salama M S, et al. Assessment of vegetation dynamics and their response to variations in precipitation and temperature in the Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2010, 103(3-4): 519-535.
- [24] Zhang L, Guo H D, Ji L, et al. Vegetation greenness trend (2000 to 2009) and the climate controls in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073572-073572.
- [25] Zhou D W, Fan G Z, Huang R H, et al. Interannual variability of the normalized difference vegetation index on the Tibetan Plateau and its relationship with climate change. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(3): 474-484.
- [26] Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [27] Wang Qingxia, Lv Shihua, Bao Yan, et al. Characteristics of vegetation change and its relationship with climate factors in different time-scales on Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(2): 301-312. [王青霞, 吕世华, 鲍艳, 等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析. *高原气象*, 2014, 33(2): 301-312.]
- [28] Liu Junhui, Gao Jixi, Wang Wenjie. Variations of vegetation coverage and its relations to global climate changes on the Tibetan Plateau during 1981-2005. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(2): 234-242. [刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系. *山地学报*, 2013, 31(2): 234-242.]
- [29] Wade A A, Theobald D M, Laituri M J. A multi-scale assessment of local and contextual threats to existing and potential US protected areas. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(3): 215-227.

- [30] Crist P J, Kohley T W, Oakleaf J. Assessing land-use impacts on biodiversity using an expert systems tool. *Landscape Ecology*, 2000, 15(1): 47-62.
- [31] Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [32] Zhao N, Yue T X. A modification of HASM for interpolating precipitation in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 116(1): 273-285.
- [33] Li Jing, Fan Zemeng, Yue Tianxiang. Spatio-temporal simulation of land cover scenarios in southwest of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3266-3275. [李婧, 范泽孟, 岳天祥. 中国西南地区土地覆盖情景的时空模拟. *生态学报*, 2014(12): 3266-3275.]
- [34] Yue T X. *Surface Modeling: High Accuracy and High Speed Methods*. Vol. 2. New York: CRC Press, 2011.
- [35] Yue T X, Fan Z M, Liu J Y. Scenarios of land cover in China. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(4): 317-342.
- [36] Yue T X, Fan Z M, Liu J Y. Changes of major terrestrial ecosystems in China since 1960. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(4): 287-302.
- [37] Fan Zemeng, Yue Tianxiang, Liu Jiyuan, et al. Spatial and temporal distribution of land cover scenarios in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(6): 63-74. [范泽孟, 岳天祥, 刘纪远, 等. 中国土地覆盖时空变化未来情景分析. *地理学报*, 2005, 60(6): 63-74.]
- [38] Yue T X, Zhao N, Ramsey R D, et al. Climate change trend in China, with improved accuracy. *Climatic Change*, 2013, 120(1): 137-151.
- [39] Fan Zemeng, Yue Tianxiang, Chen Chuanfa. Downscaling of global mean annual temperature under different scenarios. *Progress in Geography*, 2012, 31(3): 267-274. [范泽孟, 岳天祥, 陈传法. 全球平均气温未来情景的降尺度分析. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 267-274.]
- [40] Fan Zemeng, Yue Tianxiang, Chen Chuanfa, et al. Downscaling simulation for the scenarios of precipitation in China. *Geographical Research*, 2012, 31(12): 2283-2291. [范泽孟, 岳天祥, 陈传法, 等. 中国降水未来情景的降尺度模拟. *地理研究*, 2012, 31(12): 2283-2291.]
- [41] Yue T X, Wang S H. Adjustment computation of HASM: A high-accuracy and high-speed method. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(11): 1725-1743.
- [42] Fan Zemeng, Yue Tianxiang, Song Yinjun. Changing trends of temperature and precipitation based on YUE-HASM method. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 634-652. [范泽孟, 岳天祥, 宋印军. 基于 YUE-HASM 方法的气温与降水时空变化趋势. *地理研究*, 2009, 28(3): 643-652.]
- [43] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8. [张懿锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-8.]
- [44] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. The data publish of A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China: Geographical information system data of the boundary and area of the Tiebetan Plateau in China. *Global Change Research Data Publishing & Repository*, 2014. doi: 10.3974/geodb.2014.01.12.v1. [张懿锂, 李炳元, 郑度. 《论青藏高原范围与面积》一文数据的发表: 青藏高原范围界线与面积地理信息系统数据. *全球变化科学研究数据出版系统*, 2014. doi: 10.3974/geodb.2014.01.12.v1.]
- [44] Fan Z M, Zhang X, Li J, et al. Land-cover changes of national nature reserves in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 258-270.
- [45] Fan Zemeng, Zhang Xuan, Li Jing, et al. Transition trends of land-cover in national nature reserves of China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(12): 1623-1633. [范泽孟, 张轩, 李婧, 等. 国家级自然保护区土地覆盖类型转换趋势. *地理学报*, 2012, 67(12): 1623-1633.]
- [46] Yue T X, Liu J Y, Jørgensen S E, et al. Changes of Holdridge life zone diversity in all of China over half a century. *Ecological Modelling*, 2001, 144(2): 153-162.
- [47] Shary P A, Sharaya L S, Mitusov A V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, 107(1): 1-32.
- [48] Yue Tianxiang, Ma Shengnan, Wu Shixin, et al. Theoretical analysis of ecological diversity models and their application in Fukang of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 867-872. [岳天祥, 马胜男, 吴世新, 等. 生态多样性模型的理论分析及应用: 以新疆维吾尔自治区阜康地区为例. *应用生态学报*, 2006. 17(5): 867-872.]
- [49] Fan Zemeng, Yue Tianxiang. Temporal and spatial changes pattern of Holdridge life zones and diversity in China. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 121-129, 163. [范泽孟, 岳天祥. 中国 Holdridge 生命地带及其多样性的时空变化

- 分析. 地理研究, 2005, 24(1): 121-129, 163.]
- [50] Yue T X. Studies on models for biodiversity. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 377-380. [岳天祥. 生物多样性模型研究. 自然资源学报, 1999, 14(4): 377-380.]
- [51] Yue T X, Xu B, Liu J Y. A patch connectivity index and its change in relation to new wetland at the Yellow River Delta. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(21): 4617-4628.
- [52] van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 5.
- [53] Fan Z M, Li J, Yue T X, et al. Scenarios of land cover in karst area of southwestern China. *Environment Earth Science*, 2015, 74(1): 6407-6420.
- [54] Xu Haigen, Cao Mingchang, Wu Jun, et al. *China Biodiversity Assessment Report*. Beijing: Science Press, 2013. [徐海根, 曹铭昌, 吴军, 等. 中国生物多样性本底评估报告. 北京: 科学出版社, 2013.]

Scenarios simulation of vascular plant species abundance distribution on Qinghai-Tibet Plateau

FAN Zemeng^{1,2}, HUANG Yan^{1,2}, YUE Tianxiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For quantitatively explaining the relationship between the vascular plant abundance and habitat factors in the Qinghai-Tibet Plateau, a spatial simulation method has been developed to simulate the distribution of vascular plant species abundance. In this paper, seven datasets covering 37 national nature reserves were used to screen the best correlation equation between the vascular plant abundance and habitat factors in the plateau. These datasets include information on the vascular plant type, land cover, mean annual biotemperature, average total annual precipitation, topographic relief, patch connectivity and ecological diversity index. The results show that the multiple correlation coefficient between vascular plant abundance and various of habitat factors is 0.94, the mean error validated with the vascular plant species data of 37 national nature reserves is 2.21 types/km², and the distribution of vascular plant species abundance gradually decreases from southeast to northwest, and reduces with increasing altitude except for the desert area of Qaidam Basin on the Qinghai-Tibet Plateau. Furthermore, the changes of vascular plant species abundance in the plateau during the periods from 1981 to 2010 (T0), from 2011-2040 (T2), from 2041 to 2070 (T3) and from 2071 to 2100 (T4) were simulated by combining the land cover change in China and the climatic scenarios of CMIP5 RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. The results from T0 to T4 show that the vascular plant species abundance in the plateau would decrease in the future, the vascular plant species abundance had the biggest change ranges under RCP8.5 scenario and the smallest change ranges under RCP2.6 scenario. In short, dynamic change and interaction of habitat factors directly affect the spatial distribution of vascular plant species abundance on the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; vascular plant species abundance; spatial distribution; scenarios simulation