

DOI: 10.5846/stxb201903260569

范泽孟, 范斌. 欧亚大陆植被生态系统平均中心时空偏移的情景模拟. 生态学报, 2019, 39(22): - .

Fan Z M, Fan B. Shift scenarios of mean centers in vegetation ecosystems in Eurasia. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): - .

欧亚大陆植被生态系统平均中心时空偏移的情景模拟

范泽孟^{1,2,3,*}, 范斌^{1,2}

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 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要: 欧亚大陆复杂多样的植被生态系统在全球气候变化的驱动下, 其时空分布格局将发生系列的偏移变化, 进而对欧亚大陆“一带一路”沿线国家和地区的生态环境产生重要影响。如何从全球气候变化驱动的角度来实现欧亚大陆植被生态系统时空偏移趋势的模拟分析, 已成为“一带一路”沿线国家和地区生态环境研究的热点科学问题之一。在对 HLZ 生态系统模型进行改进和构建植被生态系统平均中心时空偏移分析模型的基础上, 基于欧亚大陆的气候观测数据(1981—2010 年)和 CMIP5 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种情景数据(2011—2100 年), 实现欧亚大陆植被生态系统平均中心时空偏移趋势的模拟分析。结果表明: 欧亚大陆植被生态系统平均中心主要分布在欧亚大陆的中部和南部地区; 3 种气候情景下, 欧亚大陆的亚热带干旱森林、暖温带湿润森林、亚热带有刺疏林、亚热带潮湿森林、冷温带潮湿森林、寒温带湿润森林、冷温带湿润森林、亚热带湿润森林、暖温带干旱森林、亚极地/高山湿润苔原和极地/冰原等植被生态系统的平均中心偏移幅度大于其他植被生态系统类型; 欧亚大陆植被生态系统在 RCP8.5 情景下的植被生态系统平均中心偏移幅度大于其他两种情景; 在 2010—2100 年期间, 3 种气候变化情景下, 欧亚大陆植被生态系统平均中心整体上呈向北偏移的变化趋势。

关键词: 气候变化; 植被生态系统; 平均中心时空偏移分析模型; 情景模拟; 欧亚大陆

Shift scenarios of mean centers in vegetation ecosystems in Eurasia

FAN Zemeng^{1,2,3,*}, FAN Bin^{1,2}

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Due to global climate change, the mean centers in vegetation ecosystems in Eurasia show a series of spatiotemporal shifts that directly influence the ecological environment in the countries and regions along the Belt and Road Initiative (BRI) area. This research aims to analyze the spatiotemporal shift trends of vegetation ecosystems under climate change in Eurasia and obtain new data and theoretical support for BRI projects. The Holdridge Life Zone (HLZ) model has been improved upon and the spatiotemporal shift model of the mean center was developed to quantitatively reveal the spatiotemporal shift trends of the mean centers in vegetation ecosystems in Eurasia. Based on the climatic observation data of Eurasia during the period from 1981 to 2010 and the climatic scenarios data during the period from 2011 to 2100 of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 released by CMIP5, the spatiotemporal shift trends of the mean centers in vegetation ecosystems were obtained. The results show that most mean centers in vegetation ecosystems are distributed in the central and south

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0507202, 2017YFA0603702, 2017YFC0503806); 中国科学院先导专项 A 类项目课题(XDA20030203); 国家自然科学基金项目(41271406, 41421001); 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(O88RA600YA)

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanzm@lreis.ac.cn

parts of Eurasia. The mean centers in subtropical dry forest, warm temperate moist forest, subtropical thorn woodland, subtropical wet forest, cool temperate wet forest, cold temperate moist forest, cool temperate moist forest, subtropical moist forest, warm temperate dry forest, polar/nival area, and subpolar/alpine moist tundra would shift more than any other mean centers in vegetation ecosystems under the three scenarios in Eurasia. The mean centers in vegetation ecosystems under the RCP8.5 scenario would shift more than the other two scenarios in Eurasia. Climate change would greatly alter the distribution pattern of vegetation ecosystems and cause most of the mean centers in vegetation ecosystems to shift to the northern region of Eurasia from 2010 to 2100 under the three scenarios.

Key Words: climate change; vegetation ecosystem; spatiotemporal shift model of the mean center; scenario analysis; Eurasia

全球变化对人类的生存环境及社会经济的可持续发展产生了重要的影响^[1]。气候变化作为全球变化的一个重要方面,将引起植被生态系统的时空分布格局发生系列的演替和变化^[2-4]。气候与植被之间的相互作用关系研究,一直是全球变化和陆地生态系统研究的热点问题^[5]。大量研究表明,温度和降水等主要气候要素的变化会导致动植物生境发生改变,进而影响物种分布格局及其生态系统过程^[6-9]。通过历史气候观测数据,可以构建植被生态系统空间分布模型,进而对气候变化可能引起植被生态系统的时空分布格局进行模拟分析^[10-12]。目前,模拟气候与植被生态系统相互作用的主流模型包括 HLZ 生态系统模型^[13]、BOX 模型^[14]、DOLY 模型^[15]、MAPSS 模型^[16]和 IBIS 模型^[17]等。其中,HLZ 生态系统模型仅根据年平均生物温度、年降水量和潜在蒸散比率 3 个主要的生物气候要素,定量刻画不同植被生态系统,由于模型参数相对于其他模型更为简单,被国内外学者广泛应用^[18-22]。

随着时间的不断推移,在气候与人文因素的共同作用下,植被生态系统的时空分布格局将发生系列偏移和变化,如何通过植被生态系统的时空偏移来揭示植被生态系统对气候变化的响应关系,已受到国内外相关领域研究人员的热点关注^[23-25]。欧亚大陆植被生态系统复杂多样,其植被生态系统对气候变化响应关系的研究意义重大^[26-27]。目前,国内外基于平均中心模型对各种生态系统的时空变化格局研究以及欧亚大陆植被生态系统对气候变化的响应研究已取得了大量的研究进展^[28-33]。譬如,范泽孟等^[28]对 1960—2002 年中国 HLZ 生态系统平均中心的时空分布及偏移趋势进行了模拟分析;王建兵^[29]分析了 1971—2010 年甘南草原的 HLZ 生态系统的偏移趋势及干湿变化;曹慧明等^[30]分析了 1990—2005 年泸沽湖流域生态系统平均中心的变化趋势及影响因素;Zhang 等^[31]对内蒙古近半个世纪气候变化导致的 HLZ 生态系统平均中心偏移变化进行了研究;He 等^[32]用中心模型对北京地区生态系统服务价值进行了评估;孙立群等^[27]基于植被指数和气象数据发现欧亚大陆不同生态区植被对降水的响应有明显的时空差异;Yu 等^[33]用历史气候数据及未来情景数据模拟发现欧亚大陆北部和北美森林有向北极偏移的趋势。以上研究主要集中在中小尺度区域的气候与植被生态系统研究方面,而针对大尺度区域,尤其是欧亚大陆的植被生态系统平均中心时空偏移模拟分析则很少涉及。

该论文针对在未来气候变化情景下,如何定量揭示欧亚大陆植被生态系统对未来气候变化的响应机理问题,在对 HLZ 生态系统模型进行修正和对平均中心模型进行拓展的基础上^[34],构建了欧亚大陆植被生态系统平均中心时空偏移分析模型。结合 1981—2010 年(T₀)的欧亚大陆气候观测数据和 IPCC CMIP5 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种情景的 2011—2040 年(T₁)、2041—2070 年(T₂)、2071—2100 年(T₃)的气候模式,在分别实现 T₀、T₁、T₂ 和 T₃ 四个时段的欧亚大陆植被生态系统时空分布的基础上,分别实现 T₀—T₃ 时段内的欧亚大陆各种植被生态系统平均中心时空偏移趋势的模拟和分析,揭示各种情景下的植被生态系统平均中心偏移的时空差异特征,从而为“一带一路”沿线国家和地区的生态环境综合评估等提供科学数据和方法支撑^[26]。

1 研究数据与方法

1.1 基础数据及其处理

气候数据包括观测数据和模式模拟情景数据。其中,气候观测数据来源于欧亚大陆气象台站 1981—2010 年观测的月气候数据 (Monthly Climate Data for the World, MCDW)。气候情景数据采用 IPCC CMIP5 发布的能代表未来温室气体排放的高中低三种情景^[35],即:RCP2.6(低排放情景)、RCP4.5(中间排放情景)、RCP8.5(高排放情景)(<http://www.ipcc-data.org>)。欧亚大陆的 DEM 数据采用 SRTM 数据,数据来源于 <http://srtm.csi.cgiar.org>,运用重采样方法将空间分辨率为 1 km×1 km 的 DEM 数据重采样后形成 0.125°×0.125°空间分辨率的 DEM 数据。

如何对气象站点的观测数据进行空间插值,以及对气候情景数据进行空间降尺度,获取高精度的气候要素空间数据,对于气候变化驱动下植被生态系统分布特征及时空偏移的模拟结果具有重要的影响。鉴于高精度曲面建模 (HASM) 方法^[36],能够克服反距离加权模型 (IDW)、三角网模型 (TIN)、克里金模型 (Kriging)、样条插值模型 (Spline) 等常用方法的理论缺陷并提升模型的模拟精度^[37-38]。因此,在进行气候观测数据空间插值和未来气候情景数据空间降尺度的过程中,采用 HASM 方法,并结合经纬度及高程数据,实现气候观测数据的空间插值和未来气候情景数据的空间降尺度^[39],分别获得欧亚大陆 0.125°×0.125°空间分辨率的 T0、T1、T2 和 T3 四个时段的年平均生物温度、年降水量和潜在蒸散比率数据。

1.2 研究方法

1.2.1 HLZ 生态系统模型

HLZ (Holdridge life zone) 生态系统模型是根据年平均生物温度、年降水量和潜在蒸散比率三个主要的生物气候要素,对植被生态系统类型进行空间刻画的模型。在对模型输入参数进行修正的基础上,构建适用于欧亚大陆植被生态系统分类及空间模拟的模型,可用下式进行表征^[34,37,40]:

$$\text{MAB}(x, y, t) = \frac{1}{365} \sum_{j=1}^{365} \text{TEM}(j, x, y, t) \quad (1)$$

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

$$\text{PER}(x, y, t) = \frac{58.93\text{MAB}(x, y, t)}{\text{TAP}(x, y, t)} \quad (3)$$

$$\text{HLZ}_i(x, y, t) = \sqrt{(M(x, y, t) - M_{i0})^2 + (T(x, y, t) - T_{i0})^2 + (P(x, y, t) - P_{i0})^2} \quad (4)$$

其中, $\text{MAB}(x, y, t)$ 、 $\text{TAP}(x, y, t)$ 、 $\text{PER}(x, y, t)$ 分别为 t 时刻位置 (x, y) 处的平均生物温度 (°C)、年降水量 (mm) 和潜在蒸散比率; $M(x, y, t) = \ln\text{MAB}(x, y, t)$; $T(x, y, t) = \ln\text{TAP}(x, y, t)$; $P(x, y, t) = \ln\text{PER}(x, y, t)$; M_{i0} 、 T_{i0} 和 P_{i0} 分别是第 i 个植被生态系统类型中心点的 MAB 、 TAP 和 PER 的对数标准参考值; $\text{HLZ}_i(x, y, t)$ 为 t 时刻位置 (x, y) 处的植被生态系统类型。

1.2.2 植被生态系统平均中心时空偏移分析模型

植被生态系统平均中心时空偏移分析模型,是一个在模拟植被生态系统平均中心分布的基础上,根据植被生态系统平均中心的时空偏移距离和方向,对植被生态系统时空分布格局变化进行定量阐述的空间分析模型^[34,37],其理论公式可表达为:

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^{I_j(t)} \frac{s_{ij}(t) \cdot X_{ij}(t)}{S_j(t)} \quad (5)$$

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^{I_j(t)} \frac{s_{ij}(t) \cdot Y_{ij}(t)}{S_j(t)} \quad (6)$$

式中, t 为时间变量; $I_j(t)$ 为第 j 种植被生态系统的斑块数; $s_{ij}(t)$ 为第 j 种植被生态系统第 i 个斑块的面积;

$S_j(t)$ 为第 j 种植被生态系统的总面积; $(X_{ij}(t), Y_{ij}(t))$ 为第 j 种植被生态系统第 i 个斑块几何中心的经纬度坐标; $(x_j(t), y_j(t))$ 为第 j 种植被生态系统的平均中心坐标。

第 j 种植被生态系统平均中心的偏移距离和方向可分别为:

$$d_j = \sqrt{(x_j(t+1) - x_j(t))^2 + (y_j(t+1) - y_j(t))^2} \quad (4)$$

$$\theta_j = \arctg\left(\frac{y_j(t+1) - y_j(t)}{x_j(t+1) - x_j(t)}\right) \quad (5)$$

式中, d_j 为第 j 种植被生态系统平均中心从 t 到 $t+1$ 时段的偏移距离; θ_j 为第 j 种植被生态系统平均中心从 t 到 $t+1$ 时段的移动方向, 0° 、 90° 、 180° 和 270° 分别代表正东、正北、正西和正南; $(x_j(t), y_j(t))$ 和 $(x_j(t+1), y_j(t+1))$ 分别代表第 j 种植被生态系统 t 时段和 $t+1$ 时段的平均中心坐标; 当 $345^\circ < \theta_j \leq 15^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向东偏移; 当 $15^\circ < \theta_j \leq 75^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向东北方向偏移; 当 $75^\circ < \theta_j \leq 105^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向北偏移; 当 $105^\circ < \theta_j \leq 165^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向西北方向偏移; 当 $165^\circ < \theta_j \leq 195^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向西偏移; 当 $195^\circ < \theta_j \leq 255^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向西南方向偏移; 当 $255^\circ < \theta_j \leq 285^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向南偏移; 当 $285^\circ < \theta_j \leq 345^\circ$ 时, 近似认为第 j 种植被生态系统的平均中心从 t 时段到 $t+1$ 时段向东南方向偏移。

2 模拟结果

2.1 植被生态系统平均中心的空间分布

欧亚大陆植被生态系统及其平均中心的模拟结果表明(图1), 植被生态系统平均中心主要位于欧亚大陆

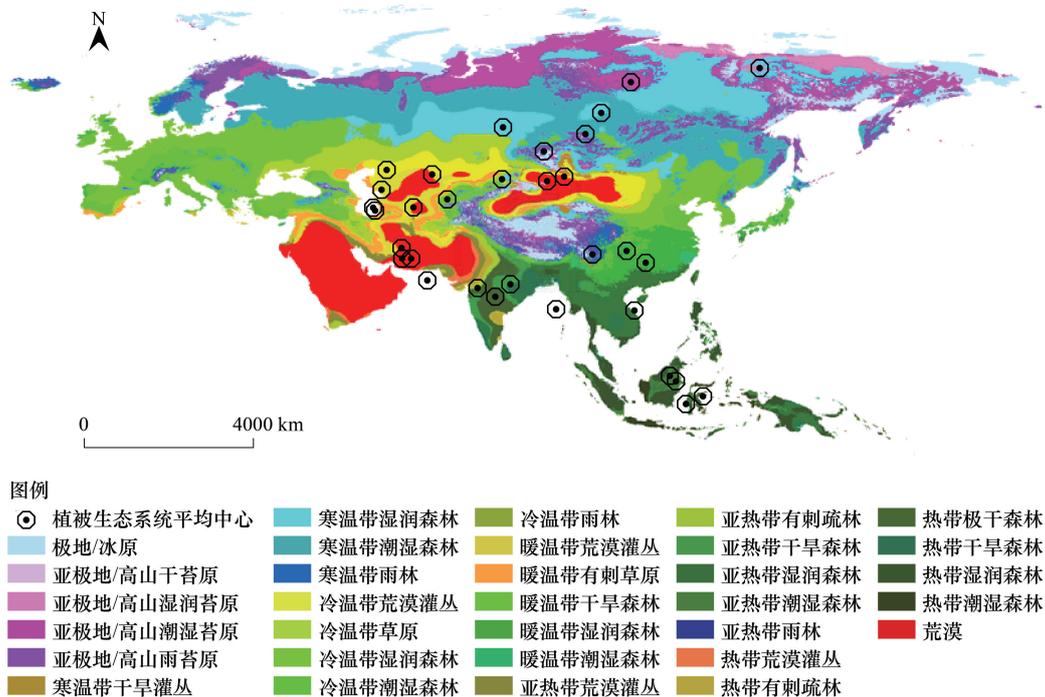


图1 欧亚大陆各种植被生态系统平均中心的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of mean centers in vegetation ecosystems types in Eurasia

的中部和南部地区。其中,极地/冰原、亚极地/高山干苔原、亚极地/高山潮湿苔原、亚极地/高山雨苔原、寒温带干旱灌丛、寒温带湿润森林、寒温带潮湿森林、寒温带雨林、冷温带荒漠灌丛、冷温带草原、冷温带湿润森林、冷温带潮湿森林、暖温带荒漠灌丛、暖温带有刺草原、暖温带干旱森林、亚热带荒漠灌丛、亚热带有刺疏林、热带荒漠灌丛以及荒漠等生态系统的平均中心主要位于中亚、西亚及蒙古高原,呈由西南到东北方向的带状分布。冷温带雨林、暖温带湿润森林、暖温带潮湿森林、亚热带干旱森林、亚热带湿润森林、亚热带潮湿森林、亚热带雨林、热带有刺疏林、热带极干森林、热带干旱森林、热带湿润森林、热带潮湿森林等植被生态系统的平均中心主要位于南亚、东亚和东南地区,整体呈马来西亚-中国西南-印度方向的带状分布。亚极地/高山湿润苔原的平均中心主要位于俄罗斯东北部的高寒地区。

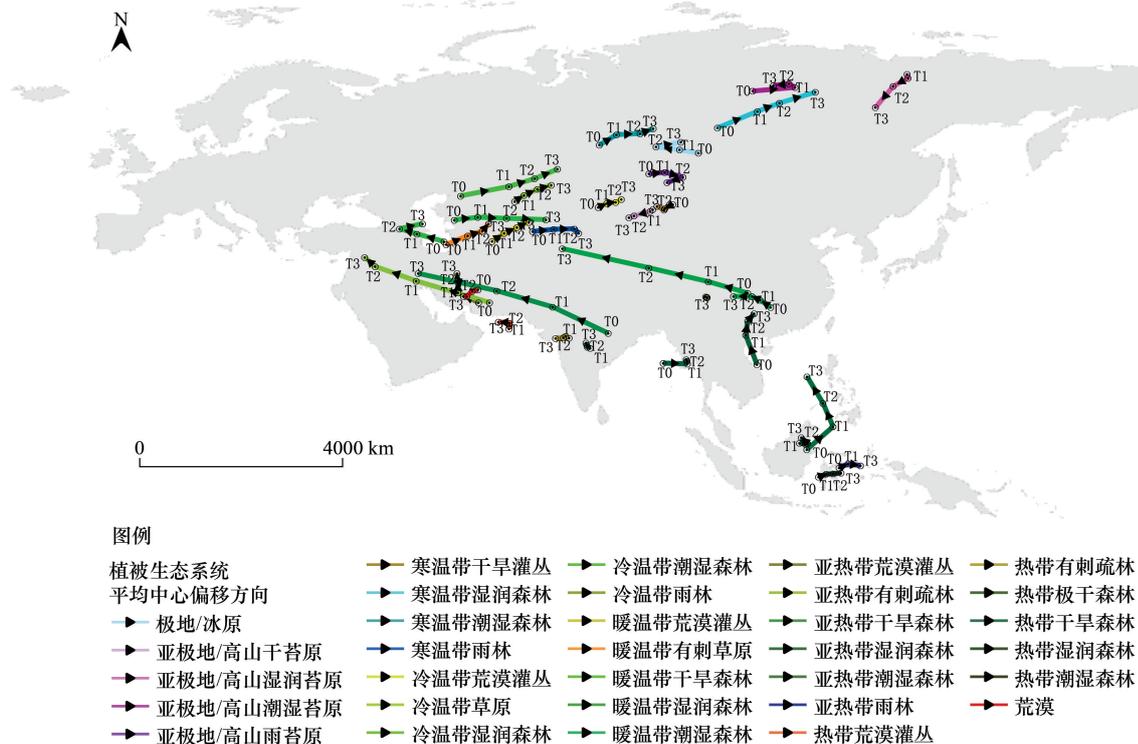


图2 RCP2.6情景下欧亚大陆植被生态系统平均中心的时空偏移趋势

Fig.2 The shift trends of mean centers in vegetation ecosystems under scenario RCP2.6 in Eurasia

图中T0、T1、T2和T3分别代表1981—2010、2011—2040、2041—2070和2071—2100四个时段(T0, T1, T2 and T3 respectively express the four periods of 1981—2010, 2011—2040, 2041—2070 and 2071—2100 in this figure)

2.2 植被生态系统平均中心的时空偏移趋势

根据RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5三种情景下欧亚大陆植被生态系统平均中心的时空偏移模拟结果(图2—4),分别对各情景下的欧亚大陆植被生态系统平均中心的偏移距离和偏移方向进行统计分析表明(表1—3);RCP2.6气候变化情景下(表1,图2),欧亚大陆亚热带干旱森林、暖温带湿润森林、亚热带有刺疏林、亚热带潮湿森林、寒温带湿润森林、冷温带湿润森林、亚热带湿润森林和冷温带潮湿森林这8种植被生态系统的平均中心的偏移幅度较大,T0—T1、T1—T2和T2—T3三个时段的平均偏移距离均大于300 km。其中,亚热带干旱森林平均中心在T0—T3时段内将整体上呈向西北方向偏移趋势,T0—T1时段将向西北方向偏移755 km,T1—T2时段将继续向西北方向偏移639 km,T2—T3时段将向西偏移847 km。暖温带湿润森林平均中心在T0—T3时段内将整体上呈向西偏移趋势,T0—T1时段将向西北方向偏移451 km,T1—T2时段将转向西偏移647 km,T2—T3时段将继续向西偏移934 km。亚热带有刺疏林平均中心在T0—T3时段内将持续向西北方向偏移,T0—T1、T1—T2和T2—T3三个时段分别偏移843 km、496 km和209 km。亚热带潮湿森林平均中

心在 T0—T3 时段内将整体上呈向北偏移趋势, T0—T1 时段将向东北方向偏移 524 km, T1—T2 时段将转向西北方向偏移 475 km, T2—T3 时段将继续向西北方向偏移 548 km。寒温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将持续向东北方向偏移, 总偏移幅度达 1199 km。冷温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向东北方向偏移趋势, T0—T1 时段将向东偏移 515 km, T1—T2 时段将转向东北方向偏移 298 km, T2—T3 时段将继续向东北方向偏移 292 km。亚热带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向北偏移趋势, T0—T1 时段将向西北方向偏移 597 km, T1—T2 时段将转向北偏移 271 km, T2—T3 时段将转向东北方向偏移 165 km。冷温带潮湿森林平均中心在 T0—T3 时段内将持续向东偏移, 总偏移幅度达 913 km。

表 1 RCP2.6 情景下欧亚大陆各种植被生态系统平均中心的偏移距离和方向

Table 1 Shift distance and direction of mean center in each vegetation ecosystem under scenario RCP2.6 in Eurasia

编码 Code	类型 Type	T0—T1		T1—T2		T2—T3	
		偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction
1	极地/冰原	198	西	239	西	261	东
2	亚极地/高山干苔原	41	西南	185	西南	60	西南
3	亚极地/高山湿润苔原	80	南	218	西南	454	西南
4	亚极地/高山潮湿苔原	425	东	95	西北	156	西
5	亚极地/高山雨苔原	158	东	201	东	193	西南
7	寒温带干旱灌丛	115	西南	27	西南	100	西北
8	寒温带湿润森林	511	东北	272	东北	416	东北
9	寒温带潮湿森林	265	东北	234	东	161	东北
10	寒温带雨林	212	东	204	东	99	东南
12	冷温带荒漠灌丛	114	东北	91	东	77	东北
13	冷温带草原	155	东北	176	东北	162	东北
14	冷温带湿润森林	515	东	298	东北	292	东北
15	冷温带潮湿森林	239	东	286	东	389	东
16	冷温带雨林	6	西南	8	东北	17	西北
18	暖温带荒漠灌丛	195	东北	172	东北	155	东北
19	暖温带刺草草原	276	东北	175	东北	154	东北
20	暖温带干旱森林	309	西北	198	西北	250	东
21	暖温带湿润森林	451	西北	647	西	934	西
22	暖温带潮湿森林	177	西北	107	西北	185	西
25	亚热带荒漠灌丛	282	西北	218	北	166	北
26	亚热带刺疏林	843	西北	496	西北	209	西北
27	亚热带干旱森林	755	西北	639	西北	847	西
28	亚热带湿润森林	597	西北	271	北	165	东北
29	亚热带潮湿森林	524	东北	475	西北	548	西北
30	亚热带雨林	116	东北	127	东	0	东
32	热带荒漠灌丛	63	北	55	北	109	西
33	热带刺疏林	52	西北	40	西南	78	西
34	热带极干森林	35	西北	46	西北	40	西北
35	热带干旱森林	239	东	58	北	32	西北
36	热带湿润森林	62	东	25	东北	130	西北
37	热带潮湿森林	93	东北	71	东	78	东
40	荒漠	64	西	118	西南	32	西

表中 T0、T1、T2 和 T3 分别代表 1981—2010、2011—2040、2041—2070 和 2071—2100 四个时段 (T0, T1, T2 and T3 respectively express the four periods of 1981—2010, 2011—2040, 2041—2070 and 2071—2100 in this table)

RCP4.5 气候变化情景下 (表 2, 图 3), 欧亚大陆 T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段的平均偏移距离均大于 300 km 的植被生态系统类型有 11 种, 其中, 亚极地/高山湿润苔原、亚热带干旱森林、暖温带湿润森林、冷温带潮湿森林、亚热带刺疏林、冷温带湿润森林、亚热带潮湿森林和寒温带湿润森林这 8 种植物生态系统的平均中心的偏移幅度较大, 在 T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段的平均偏移距离均大于 400 km。其中, 亚极地/高山湿润苔原平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向南偏移趋势, T0—T1 时段将向东南方向偏移

94 km, T1—T2 时段将转向西南方向偏移 270 km, T2—T3 时段将继续向西南方向偏移 2031 km。亚热带干旱森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向西偏移趋势, T0—T1 时段将向西北方向偏移 423 km, T1—T2 时段将继续向西北偏移 840 km, T2—T3 时段将向西偏移 921 km。暖温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向西北偏移趋势, T0—T1 时段将向西北方向偏移 307 km, T1—T2 时段将向西偏移 912 km, T2—T3 时段将向西北方向偏移 789 km。冷温带潮湿森林平均中心在 T0—T3 时段内将持续向东偏移, T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段分别偏移 215 km、717 km 和 1050 km。亚热带有刺疏林平均中心在 T0—T3 时段内将持续向西北方向偏移, 总偏移幅度达 1741 km。冷温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向东北方向偏移趋势, T0—T1 时段将向东北方向偏移 328 km, T1—T2 时段将转向东偏移 469 km, T2—T3 时段将又向东北方向偏移 574 km。亚热带潮湿森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向北偏移趋势, T0—T1 时段将向东北方向偏移 235 km, T1—T2 时段将转向北偏移 765 km, T2—T3 时段将转向西北方向偏移 368 km。寒温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将持续向东北方向偏移, 总偏移幅度达 1278 km。

表 2 RCP4.5 情景下欧亚大陆各种植被生态系统平均中心的偏移距离和偏移方向

Table 2 Shift distance and direction of mean center in each vegetation ecosystem under scenario RCP4.5 in Eurasia

编码 Code	类型 Type	T0—T1		T1—T2		T2—T3	
		偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction
1	极地/冰原	178	西	283	西	720	东北
2	亚极地/高山干苔原	142	西南	92	西南	74	西
3	亚极地/高山湿润苔原	94	东南	270	西南	2031	西南
4	亚极地/高山潮湿苔原	388	东	53	东南	394	西
5	亚极地/高山雨苔原	255	东	166	东南	119	西南
7	寒温带干旱灌丛	147	西南	30	西	167	西
8	寒温带湿润森林	549	东北	358	东北	370	东北
9	寒温带潮湿森林	217	东北	340	东	322	东
10	寒温带雨林	190	东	301	东	209	东北
12	冷温带荒漠灌丛	191	东	101	东北	172	东
13	冷温带草原	186	东北	231	东北	567	东
14	冷温带湿润森林	328	东北	469	东	574	东北
15	冷温带潮湿森林	215	东	717	东	1050	东
16	冷温带雨林	17	西南	4	北	70	北
18	暖温带荒漠灌丛	285	东北	211	东北	330	东
19	暖温带干旱草原	295	东北	235	东北	229	东北
20	暖温带干旱森林	141	西北	375	西	363	西北
21	暖温带湿润森林	307	西北	912	西	789	西北
22	暖温带潮湿森林	47	西北	244	西北	147	北
25	亚热带荒漠灌丛	243	西北	327	北	270	西北
26	亚热带有刺疏林	595	西北	654	西北	492	西北
27	亚热带干旱森林	423	西北	840	西北	921	西
28	亚热带湿润森林	488	西北	336	东北	274	东北
29	亚热带潮湿森林	235	东北	765	北	368	西北
30	亚热带雨林	190	东北	52	东南	21	东南
32	热带荒漠灌丛	105	西北	63	西	102	西北
33	热带有刺疏林	85	西北	38	西南	129	西
34	热带极干森林	40	西北	57	北	52	西北
35	热带干旱森林	108	东	162	东	185	西北
36	热带湿润森林	95	东南	83	西北	238	西北
37	热带潮湿森林	167	东	34	东	63	东
40	荒漠	114	西南	56	西	61	西北

RCP8.5 气候变化情景下(表 3,图 4),欧亚大陆 T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段的平均偏移距离均大于 300 km 的植被生态系统类型有 16 种, 占有模拟得到植被生态系统类型总数的一半, 其中, 亚极地/高

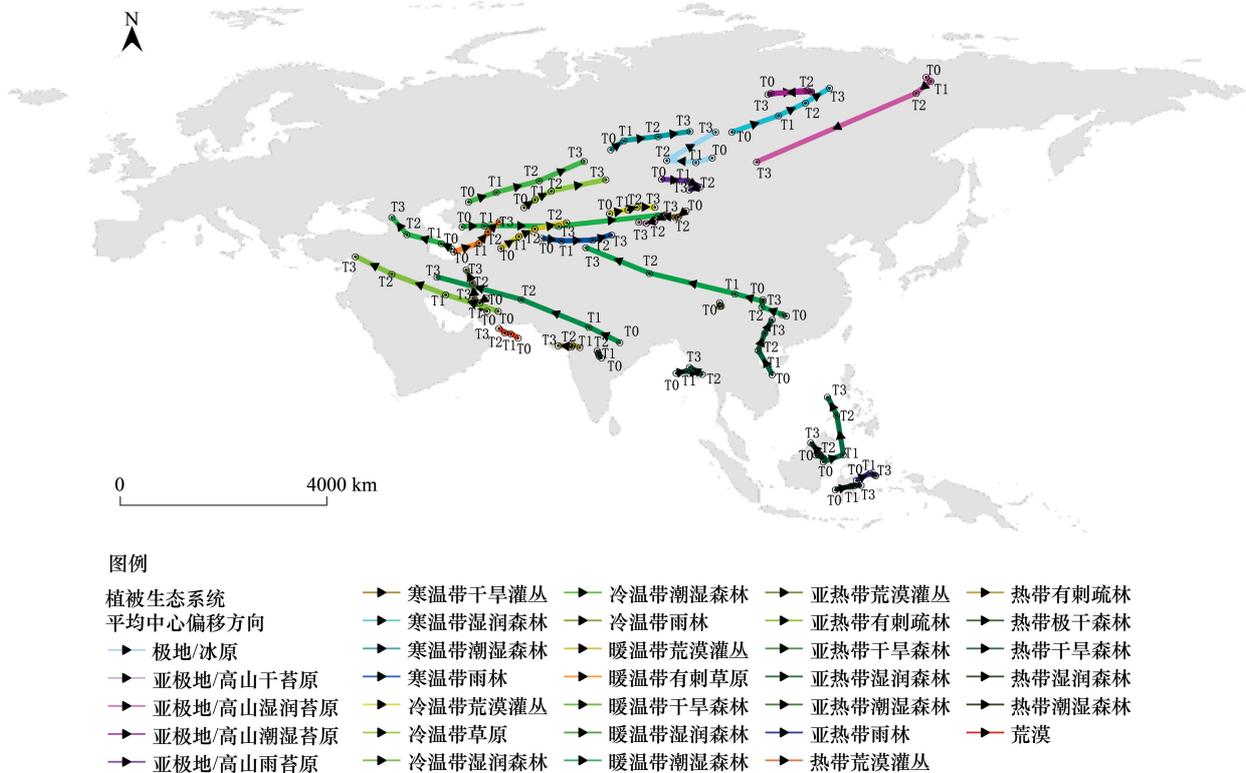


图3 RCP4.5 情景下欧亚大陆植被生态系统平均中心的时空偏移趋势

Fig.3 The shift trends of mean centers in vegetation ecosystems under scenario RCP4.5 in Eurasia

山湿润苔原、亚热带干旱森林、暖温带湿润森林、冷温带潮湿森林、亚热带潮湿森林、亚热带有刺疏林、冷温带湿润森林、寒温带湿润森林、极地/冰原和亚热带湿润森林这 10 种植被生态系统的平均中心的偏移幅度较大,在 T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段内的平均偏移距离均大于 400 km。其中,亚极地/高山湿润苔原平均中心在 T0—T3 时段内将呈持续向西南偏移趋势,T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段将分别偏移 165 km、627 km 和 3072 km。亚热带干旱森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向西北偏移趋势,T0—T1 时段将向西北方向偏移 327 km,T1—T2 时段将向西偏移 1137 km,T2—T3 时段又将向西北方向偏移 1250 km。暖温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向西北方向偏移趋势,T0—T1 时段将向西偏移 377 km,T1—T2 时段将继续向西偏移 1263 km,T2—T3 时段将向西北方向偏移 648 km。冷温带潮湿森林平均中心在 T0—T3 时段内将持续向东偏移,T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段分别偏移 404 km、879 km 和 905 km。亚热带潮湿森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向北偏移趋势,T0—T1 时段将向东北方向偏移 473 km,T1—T2 时段将转向北偏移 940 km,T2—T3 时段将转向西北方向偏移 593 km。亚热带有刺疏林平均中心在 T0—T3 时段内整体将呈西北方向偏移趋势,T0—T1 时段将向西偏移 834 km,T1—T2 时段将向西北方向偏移 634 km,T2—T3 时段将继续向西北偏移 392 km。冷温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内也均将持续向东北方向偏移,T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段分别偏移 378 km、635 km 和 713 km。寒温带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内均将持续向东北方向偏移,T0—T1、T1—T2 和 T2—T3 三个时段分别偏移 509 km、668 km 和 329 km。极地/冰原平均中心在 T0—T3 时段内将整体呈向北偏移趋势,T0—T1 时段将向西偏移 162 km,T1—T2 时段将转向西北方向偏移 236 km,T2—T3 时段将转向东北方向偏移 908 km。亚热带湿润森林平均中心在 T0—T3 时段内将整体上呈向北偏移趋势,T0—T1 时段将向西北方向偏移 446 km,T1—T2 时段将向北偏移 468 km,T2—T3 时段将转向东北方向偏移 305 km。

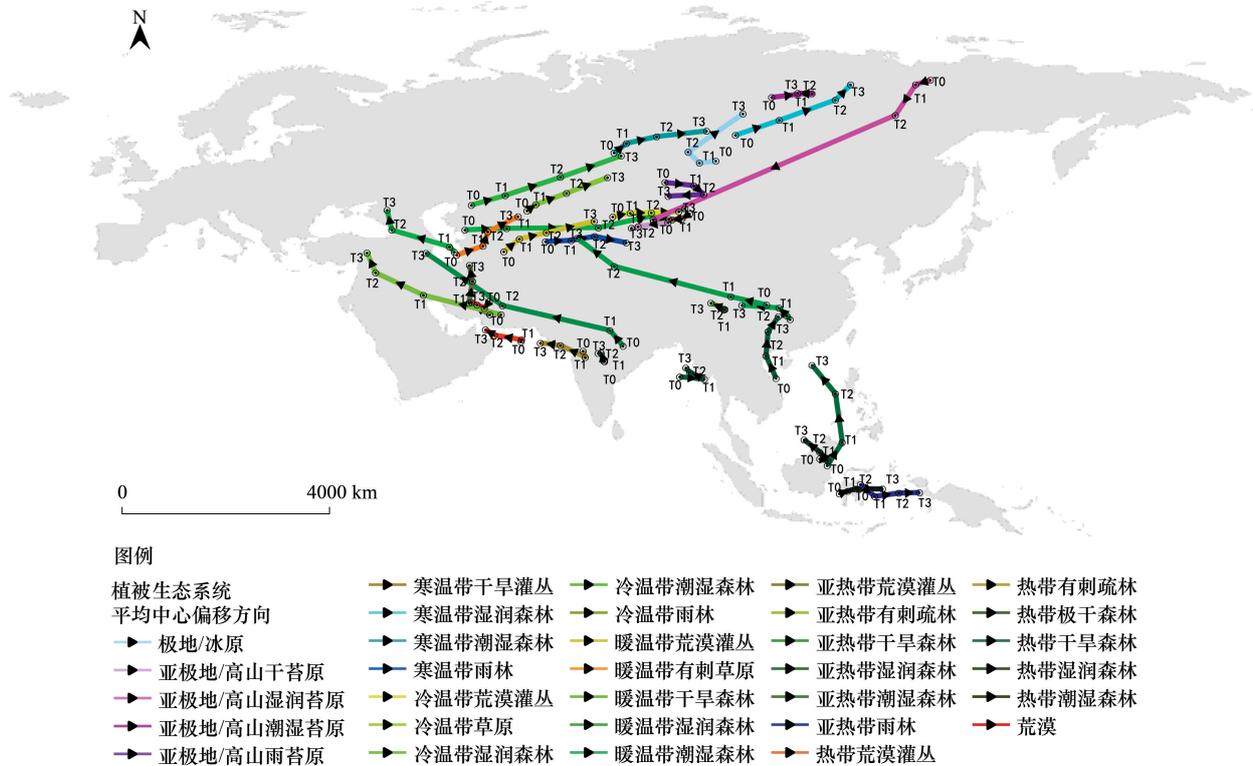


图 4 RCP8.5 情景下欧亚大陆植被生态系统平均中心的时空偏移趋势

Fig.4 The shift trends of mean centers in vegetation ecosystems under scenario RCP8.5 in Eurasia

表 3 RCP8.5 情景下欧亚大陆各种植被生态系统平均中心的偏移距离和偏移方向

Table 3 Shift distance and direction of mean center in each vegetation ecosystem under scenario RCP8.5 in Eurasia

编码 Code	类型 Type	T0—T1		T1—T2		T2—T3	
		偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction
1	极地/冰原	162	西	236	西北	908	东北
2	亚极地/高山干苔原	61	南	298	西	72	西
3	亚极地/高山湿润苔原	165	西南	627	西南	3072	西南
4	亚极地/高山潮湿苔原	339	东	59	东	140	西
5	亚极地/高山雨苔原	285	东	195	东南	343	西
7	寒温带干旱灌丛	118	西南	99	西	183	西
8	寒温带湿润森林	509	东北	668	东北	329	东北
9	寒温带潮湿森林	219	东北	319	东	490	东
10	寒温带雨林	248	东	236	东	328	东
12	冷温带荒漠灌丛	181	东	202	东	265	东
13	冷温带草原	149	东北	366	东北	498	东北
14	冷温带湿润森林	378	东北	635	东北	713	东北
15	冷温带潮湿森林	404	东	879	东	905	东
16	冷温带雨林	12	西南	15	北	168	西北
18	暖温带荒漠灌丛	284	东北	286	东	508	东
19	暖温带干旱森林	310	东北	274	东北	419	东北
20	暖温带湿润森林	112	西北	642	西北	387	北
21	暖温带潮湿森林	377	西	1263	西	648	西北
22	暖温带潮湿森林	77	西北	170	西北	360	西

续表

编码 Code	类型 Type	T0—T1		T1—T2		T2—T3	
		偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction	偏移距离 Distance/km	偏移方向 Direction
25	亚热带荒漠灌丛	304	西北	416	北	313	北
26	亚热带有刺疏林	834	西	634	西北	392	西北
27	亚热带干旱森林	327	西北	1137	西	1250	西北
28	亚热带湿润森林	446	西北	468	北	305	东北
29	亚热带潮湿森林	473	东北	940	北	593	西北
30	亚热带雨林	274	东南	242	东	198	东
32	热带荒漠灌丛	33	东北	275	西	137	西北
33	热带有刺疏林	122	东南	327	西北	201	西
34	热带极干森林	9	西北	161	西北	29	西
35	热带干旱森林	242	东	195	西北	95	西北
36	热带湿润森林	86	东	183	西北	285	西北
37	热带潮湿森林	95	东北	87	东北	258	东
40	荒漠	137	西南	96	西北	72	西北

3 讨论

HLZ 生态系统模型根据气候与植被之间的相互作用关系,采用年平均生物温度、年降水量和潜在蒸散比率三个生物气候要素来定量刻画不同类型的植被生态系统^[13],在生态系统分类、土地覆盖变化和土地利用规划等领域有着广泛的应用^[18-22],尤其在气候变化驱动下的植被生态系统空间分布方面,HLZ 生态系统模型被认为是一种有效的方法^[18,25,34,37,40]。

文中采用高精度曲面建模(HASM)方法,结合经纬度及高程数据,实现了气候观测数据的空间插值和未来气候情景数据的空间降尺度处理^[37-39],保证了模型参数数据的质量和精度。在对 HLZ 生态系统模型进行修正并构建植被生态系统平均中心时空偏移分析模型的基础上,实现了欧亚大陆 1981—2100 年内不同时段的植被生态系统平均中心的偏移幅度和方向的时空定量分析。欧亚大陆各种植被生态系统的平均中心主要位于欧亚大陆的中部和南部地区,而且整体将呈向北的偏移趋势,这与已有研究成果具有很好的一致性^[33]。因此,该论文所发展的植被生态系统平均中心时空偏移分析模型,能够对欧亚大陆各种植被生态系统平均中心的时空偏移趋势及情景进行模拟,从而实现对未来气候变化驱动下的植被生态系统平均中心时空偏移可能性的时空模拟和定量刻画。

同时,在全球变化背景下,随着“一带一路”倡议的逐步推进和实施,欧亚大陆植被生态系统平均中心的时空偏移情景的模拟分析结果,可为“一带一路”沿线国家和地区开展各种生态环境问题研究及可持续发展规划,提供科学数据与方法支撑^[26]。

4 总结

欧亚大陆植被生态系统平均中心偏移的时空模拟分析结果显示,在 1981—2100 年间的不同时段内,RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种气候变化情景驱动下,欧亚大陆各种植被生态系统的平均中心均将呈现出不同程度的时空偏移趋势。RCP8.5 情景下的植被生态系统平均中心的偏移幅度最大,RCP4.5 情景下的偏移幅度次之,而 RCP2.6 情景下的植被生态系统平均中心的偏移幅度最小。从这一分析结果可以发现,气候变化强度直接影响到植被生态系统平均中心的时空偏移幅度,气候变化越剧烈,则植被生态系统平均中心时空偏移幅度越大。

在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种气候变化情景驱动下,寒温带湿润森林和暖温带有刺草原的平均中心

在 T0—T3 时段内均将呈持续向东北方向的偏移趋势,冷温带潮湿森林平均中心在 T0—T3 时段内将呈持续向东的偏移趋势。冷温带草原平均中心除 RCP4.5 情景的 T2—T3 时段向东偏移外,其余各种情景各个时段均将呈向东北方向的偏移趋势。冷温带湿润森林平均中心除 RCP2.6 情景的 T0—T1 时段和 RCP4.5 情景的 T1—T2 时段向东偏移以外,其余各种情景各个时段均将呈向东北方向的偏移趋势。亚热带有刺疏林平均中心除 RCP8.5 情景的 T0—T1 时段向西偏移外,其余各种情景各个时段均将呈向西北方向的偏移趋势。热带极干森林平均中心除 RCP4.5 情景的 T1—T2 时段向北偏移和 RCP8.5 情景的 T2—T3 时段向西偏移外,其余各种情景各个时段均将呈向西北方向的偏移趋势。

另外,模拟分析结果显示,在 3 种气候变化情景驱动下,欧亚大陆的亚热带干旱森林、暖温带湿润森林、亚热带有刺疏林、亚热带潮湿森林、冷温带潮湿森林、寒温带湿润森林、冷温带湿润森林、亚热带湿润森林、暖温带干旱森林、亚极地/高山湿润苔原和极地/冰原等植被生态系统的平均中心偏移幅度大于其他植被生态系统类型的平均中心偏移幅度。这表明以上植被生态系统类型的时空变化对气候变化的敏感性高于其他的植被生态系统类型。

参考文献 (References):

- [1] 叶笃正,符淙斌,董文杰. 全球变化科学进展与未来趋势. 地球科学进展, 2002, 17(4): 467-469.
- [2] 周广胜,张新时. 全球变化的中国气候-植被分类研究. 植物学报, 1996, 38(1): 8-17.
- [3] Scholze M, Knorr W, Arnell N W, Prentice I C. A climate-change risk analysis for world ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(35): 13116-13120.
- [4] Biermann F. 'Earth system governance' as a crosscutting theme of global change research. Global Environmental Change, 2007, 17(3/4): 326-337.
- [5] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [6] Leemans R, Eickhout B. Another reason for concern; regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. Global Environmental Change, 2004, 14(3): 219-228.
- [7] 周广胜,何奇瑾. 生态系统响应全球变化的陆地样带研究. 地球科学进展, 2012, 27(5): 563-572.
- [8] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the earth and its drivers. Nature Climate Change, 2016, 6(8): 791-795.
- [9] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [10] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F N, de Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. Nature, 2004, 427(6970): 145-148.
- [11] 钱拴,伏洋, PAN F F. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(10): 1439-1445.
- [12] 岳天祥,范泽孟. 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究. 科学通报, 2014, 59(3): 217-231.
- [13] Holdridge L R. Life Zone Ecology. San José, Costa Rica: Tropical Science Center, 1967.
- [14] Box E O. Predicting physiognomic vegetation types with climate variables. Vegetatio, 1981, 45(2): 127-139.
- [15] Woodward F I. Climate and Plant Distribution. New York: Cambridge University Press, 1987.
- [16] Neilson R P, King G A, Koerper G. Toward a rule-based biome model. Landscape Ecology, 1992, 7(1): 27-43.
- [17] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 603-628.
- [18] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [19] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. 第四纪研究, 1993, (2): 157-169.
- [20] 范泽孟,李婧,岳天祥. 黄土高原生态系统过渡带土地覆盖的时空变化分析. 自然资源学报, 2013, 28(3): 426-436.
- [21] 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, 34(12): 3266-3275.
- [22] Szelepcsényi Z, Breuer H, Kis A, Pongrácz R, Sümegei P. Assessment of projected climate change in the Carpathian Region using the Holdridge life

- zone system. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 131(1/2): 593-610.
- [23] Weismiller R A, Kristof S J, Scholz D K, Anuta P E, Momin S A. Change detection in coastal zone environments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, 43(12): 1533-1539.
- [24] Liu D J, Ogaya R, Barbeta A, Yang X H, Peñuelas J. Long-term experimental drought combined with natural extremes accelerate vegetation shift in a Mediterranean holm oak forest. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 151: 1-11.
- [25] Belotelov N V, Bogatyrev B G, Kirilenko A P, Venevsky S V. Modelling of time-dependent biome shifts under global climate changes. *Ecological Modelling*, 1996, 87(1/3): 29-40.
- [26] 刘卫东. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题. *地理科学进展*, 2015, 34(5): 538-544.
- [27] 孙立群, 李晴岚, 陈骥, 牛俊. 欧亚大陆不同生态区植被生长对降水响应的季节变化规律. *生态学报*, 2018, 38(22): 8051-8059.
- [28] 范泽孟, 岳天祥, 田永中. 中国 Holdridge 生命地带平均中心的时空分布及其偏移趋势. *生态学报*, 2004, 24(7): 1380-1387.
- [29] 王建兵. 近 40 年甘南草原生命地带偏移趋势及干湿变化. *应用气象学报*, 2012, 23(5): 604-608.
- [30] 曹慧明, 董仁才, 邓红兵, 余丽军, 刘建军, 王宏伟, 马赫. 区域生态系统重心指标的概念与应用. *生态学报*, 2016, 36(12): 3639-3645.
- [31] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, Sakurai K. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 377-389.
- [32] He Y B, Chen Y Q, Tang H J, Yao Y M, Yang P, Chen Z X. Exploring spatial change and gravity center movement for ecosystem services value using a spatially explicit ecosystem services value index and gravity model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 175(1/4): 563-571.
- [33] Yu M, Wang G L, Parr D, Ahmed K F. Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8.5 climate projections from 19 GCMs. *Climatic Change*, 2014, 127(2): 257-271.
- [34] 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.
- [35] van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt G C, Kram T, Krey V, Lamarque J F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S J, Rose S K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 5-31.
- [36] Yue T X. *Surface Modeling: High Accuracy and High Speed Methods*. New York: CRC Press, 2011.
- [37] Yue T X, Fan Z M, Chen C F, Sun X F, Li B L. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2342-2361.
- [38] Yue T X, Zhao N, Fan Z M, Li J, Chen C F, Lu Y M, Wang C L, Xu B, Wilson J. CMIP5 downscaling and its uncertainty in China. *Global and Planetary Change*, 2016, 146: 30-37.
- [39] 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] Yue T X, Fan Z M, Liu J Y. Scenarios of land cover in China. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(4): 317-342.