

内蒙古1981—2010年干湿气候类型和 净第一性生产力演变

代海燕¹, 都瓦拉¹, 王晓江², 李丹¹, 苏东玉³

(1. 内蒙古生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古林业科学研究院, 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古气象台, 呼和浩特 010051)

摘要:为了更好地服务于内蒙古地区生态建设, 提供地区大气候背景的演变过程。运用徐文铎湿润指数划分了内蒙古地区的干湿气候类型, 研究表明: 1981—2010年内蒙古半干旱区、干旱区+极干旱区面积、亚湿润区+湿润区面积分别为343 090, 388 035, 411 819 km²; 2001—2010年半干旱区+干旱区+极干旱区面积是20世纪90年代面积的1.3倍; 半湿润区+湿润区面积减少了0.5倍, 地区生态环境质量进一步下降。干湿气候类型与历年降水量分布图对比显示, 干旱区和极干旱区面积与200 mm降水量分布线对应; 湿润区在东北地区与400 mm分布线接近; 分布最广的半干旱区受温度和降水综合影响较多, 与雨量带分布无明显关系。1981—2010年, 温度呈显著增加趋势, 降水量下降趋势属正常气候波动。地区净第一性生产力(NPP)与降水量的相关系数达到显著水平, 相关系数为0.930 0, 而与温度的相关系数只有-0.270 0。年代际NPP在2001—2010年下降明显, 从西北到东南阶梯式降低, 受影响较大的地区主要分布在呼伦贝尔市西部的典型草原和温性草甸草原, 赤峰市和通辽市也下降明显; 总趋势是东部区下降明显, 西部区波动变化, 整体下降明显。

关键词: 内蒙古; 气候变化; 湿度指数; 气候类型; 净第一性生产力

中图分类号: P462; Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0222-05

Climate Type and Net Primary Productivity Evolution Process in Inner Mongolia During 1981—2010

DAI Haiyan¹, DU Wala¹, WANG Xiaojiang², LI Dan¹, SU Dongyu³

(1. Inner Mongolia Ecology and Agricultural Meteorology Centre, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia

Academy of Forestry Science, Hohhot 010010, China; 3. Inner Mongolia Bureau of Meteorology, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to better serve the ecological construction in Inner Mongolia, provide the evolution process of regional climate background, we used humidity index method to analyze the types of dry and wet climate change in Inner Mongolia during 1981—2010. The results show that half arid area, arid region and subhumid area or humid area were 343 090 km², 388 035 km² and 411 819 km², respectively, in Inner Mongolia in recent 30 years. Half arid area+arid region+extremely arid areas during 2001—2010 were 1.3 times of those during 1991—2000, subhumid area+humid area decreased by 0.5 times; comparison of dry and wet climate type with historical precipitation distribution shows that arid region and below were close to the area with more than 200 mm of precipitation; humid region were close to area with more than 400 mm of precipitation in northeast of Inner Mongolia; the most widespread half arid areas were affected by the temperature and precipitation, which had nothing to do with the rainfall distribution; correlation analysis indicated that the temperature presented the significantly increasing trend, and precipitation decline resulted from the climate fluctuation in nearly 30 years; correlation coefficient of regional net primary productivity and precipitation is 0.930 0, and correlation coefficient of regional net primary productivity and temperature is only -0.270 0;

收稿日期: 2017-08-04

修回日期: 2017-08-17

资助项目: 国家自然科学基金(41461102); 林业公益性行业专项(201304206); 内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxjcx201416); 内蒙古自治区自然科学基金(2016MS0376)

第一作者: 代海燕(1978—), 男(蒙古族), 辽宁阜新人, 博士, 高级工程师, 主要从事林业气象与生态气象研究。E-mail: daihaiyan2003@163.com

通信作者: 都瓦拉(1979—), 女(蒙古族), 内蒙古通辽人, 博士, 高级工程师, 主要从事以蒙古高原为研究区的自然灾害监测预警与评价研究。

E-mail: dwlrsgis@163.com

the interdecadal changes indicated that NPP significantly decreased during 2001—2010, presenting the stepped down from northwest to southeast, the area greatly influenced mainly distributed in the typical steppe and meadow steppe in western of Hulunbuir City, at the same time, NPP significantly decreased in Chifeng City and Tongliao City in recent 20 years, NPP significantly decreased in eastern district area, NPP fluctuated in the western area.

Keywords: Inner Mongolia; climatic change; humidity index; climate type; net primary productivity

内蒙古属典型中温带季风气候,降水量少而分布不均,气候干燥。受地形和海洋的影响,内蒙古降水量自东向西由 500 mm 递减为 50 mm 左右,蒸发量自西向东由 3 000 mm 递减到 1 000 mm 左右。与之相应的气候带呈带状分布,从东向西由湿润、半湿润区逐步过渡到半干旱、干旱区。全区生态环境脆弱,又面临水土流失和土地沙化两大主要问题,因此研究内蒙古地区干湿气候变化对地区植被恢复和生态环境的改善尤为重要。本研究采用湿润指数(HI)方法^[1-3]作为综合气候指标来划分地区干湿气候类型,该方法计算方便,与植被分布对应性较好,对中国森林植被的地理分布和温度气候带的划分具有较好的指示作用^[4]。可能蒸散率(PER)^[5-9]计算的植被净第一性生产力(NPP)反映了植物群落在自然环境下的生产能力。在自然环境条件下,植被群落的生产力除受植物本身的生物学特性、土壤特性等限制外,主要受气候因子的影响。利用植被生产量与气候因子间的相关关系建立数学模型,能够估算某一地域自然植被的生产能力。世界上一些学者对建立这种模型做了许多尝试,其中 Chikugo 模型^[10-11]是基于繁茂的植被 CO₂ 通量方程与水汽通量方程之比确定植被水分利用效率(WUE),利用 682 组森林植被资料及相应的气候因素,通过统计分析而建立。周广胜等^[12-13]采用 Holdridge 生命地带系统与 Chikugo 模型首次对全球变化后中国陆地生态系统的植被地理分布及 NPP 进行了预测。一些研究者建立了联系植物生理生态特性和水热平衡关系的自然植被 NPP 模型,并利用该模型对中国自然植被 NPP 现状及全球变化后自然植被 NPP 进行了分析^[11-14]。本文在干湿气候变化的基础上,结合 NPP 分析内蒙古地区 1981—2010 年的环境演变过程,通过考察内蒙古不同下垫面的气候特征和生产力变化的关系,旨在为内蒙古地区生态环境建设提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 气象数据

本研究使用全区 11 个盟市 116 个气象站资料,时间长度为 1981—2010 年。气象资料全部来源于内

蒙古气象局气象资料数据库。

1.2 Kira 各指数与徐文铎湿度指数分类方法

温暖指数^[15-18](WI)的计算公式为:

$$WI = \sum_{i=1}^n (t_i - 5) \quad (1)$$

式中: t_i 为平均温度为 5℃ 以上的第 i 个月的平均温度; n 为月平均气温 > 5℃ 的月数。徐文铎等^[17-18]在 Kira 的热量指数基础上,提出了湿度指数[HI, mm/(℃·月)]:

$$HI = P/WI \quad (2)$$

式中: P 为年降水量(mm); $HI > 15.5$ 的地区为极湿润区, $15.5 \sim 7.5$ 的地区为湿润区, $7.5 \sim 5.5$ 为半湿润区, $5.5 \sim 3.5$ 为半干旱区, $3.5 \sim 1.5$ 为干旱区, < 1.5 地区为极干旱区,对应的植被类型分别为冷湿植被、森林、森林草原区、典型草原、荒漠草原、荒漠。

1.3 气候回归统计方法

采用回归统计方法计算内蒙古地区近 30 a 序列的气候倾向率^[19],即以年代 t 为时间因子,气候要素 x 为模拟对象,建立线性回归方程 $x(t) = c + bt$ 。其中 c, b 为待定系数, b 为气候要素趋势,若 $b > 0$ 表示气候要素呈上升趋势, $b < 0$ 表示气候要素呈下降趋势, $b \times 10$ 称为气候倾向率(气象单位/10 a)。采用相关系数法进行气候要素变化趋势的显著性检验。

1.4 空间插值

采用移动拟合法,取待定点周围距离最近的 8 个数据点作为参照点,用距离的倒数作为权重,采用线性拟合逐点进行内插^[20]。

$$MI_x = (\sum MI_i / D_i) / (\sum 1 / D_i) \quad (3)$$

式中: MI_x 为待定点的湿润指数; MI_i 为参照点的湿润指数; D_i 为待定点到参照点的距离。空间插值后经平滑得到湿润指数等值线图。

1.5 可能蒸散率

可能蒸散率(PER)计算方法^[6,9]:

$$PER = \frac{PET}{P} \quad (4)$$

式中:PER 为可能蒸散率; PET 为年可能蒸发量(mm); P 为降水量(mm)。

$$PET = BT \times 58.93 \quad (5)$$

$$BT = \frac{\sum t}{365} \text{ 或 } BT = \frac{\sum T}{12} \quad (6)$$

式中:BT 为年平均生物学温度(℃); t 为日平均温度; T 为月平均温度。

1.6 净第一性生产力(NPP)

根据周广胜等^[12]建立的自然植被的净第一性生产力模型,利用陆地表面所获得的降水量及其所获得的净辐射资料即可求取该区域潜在自然植被净第一性生产力。模型表示如下:

$$NPP = RDI^2 \cdot \frac{P \cdot (1 + RDI + RDI^2)}{(1 + RDI) \cdot (1 + RDI^2)} \cdot \exp(-\sqrt{9.87 + 6.25RDI}) \quad (7)$$

周广胜^[13]针对中国各植被地带的可能蒸散率(PER)与年辐射干燥度(RDI)分析得到回归方程:

$$RDI = (0.629 + 0.237PER - 0.00313PER^2)^2 \quad R^2 = 0.90 \quad (8)$$

式中:RDI 为辐射干燥度;NPP 为潜在净第一性生产力[t/(hm²·a)]。根据对中国各植被地带 700 余个气候站资料所计算的 PER,再经过转换计算而得到的接近于 CHIKUGO 模型的 NPP 估算值达到令人满意的结果。

2 结果与分析

2.1 近 30 a 气候类型分布及变化特点

近 30 a 内蒙古干湿气候类型划分为干旱区、半干旱区、极干旱区、半湿润区和湿润区的面积分别为 203 135,343 090,184 900,236 573,175 246 km²(表 1)。内蒙古地区气候分类法年代际变化特点表明,近 30 a 自治区干旱、半干旱区面积逐年增加,湿润区面积减少趋势明显。近 10 a 半干旱区和湿润区其波动范围都达到 90 年代面积的 2 倍左右(表 2)。

表 1 内蒙古各气候类型区面积

项目	干旱区	半干旱区	极干旱区	半湿润区	湿润区
面积/万 km ²	203135	343090	184900	236573	175246
占全区/%	17.77	30.02	16.18	20.70	15.33
盟、市(旗、县)数	6(18)	9(55)	1(3)	7(51)	2(16)

表 2 内蒙古近 30 a 气候类型面积变化 km²

气候区	2001—2010 年	1991—2000 年	1981—1990 年
湿润区	94963	175408	216408
半湿润区	149981	284430	256432
半干旱区	405822	296049	296830
干旱区	303905	202158	161187
极干旱区	188273	184900	212088

2.2 近 30 a 内蒙古气象条件

近 30 a 内蒙古地区温度呈逐渐上升的趋势,降水呈弱减少的趋势,地区暖干化趋势明显。特别是 1997 年以来 5 a 滑动平均值均在平均值以上,温度增

加趋势明显(图 1)。30 a 降水量在 1998 年后呈明显减少的趋势。其气温气候倾向率为 0.50 ℃/10 a,降水气候倾向率为-15 mm/10 a。其中气温的线性相关系数为 0.665 0($p>0.01$),呈明显增加的趋势;降水的相关系数为 0.291 0($p<0.05$),呈不显著的下降趋势,属于正常气候波动范围(图 2)。

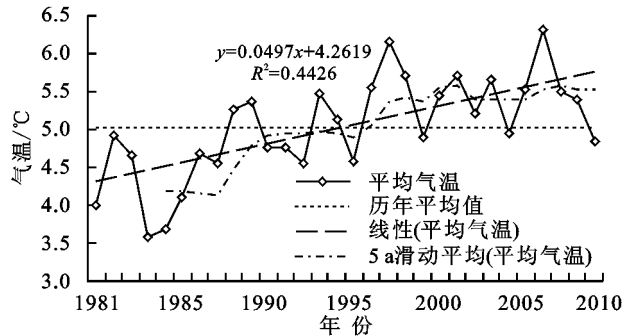


图 1 近 30 a 内蒙古年平均温度

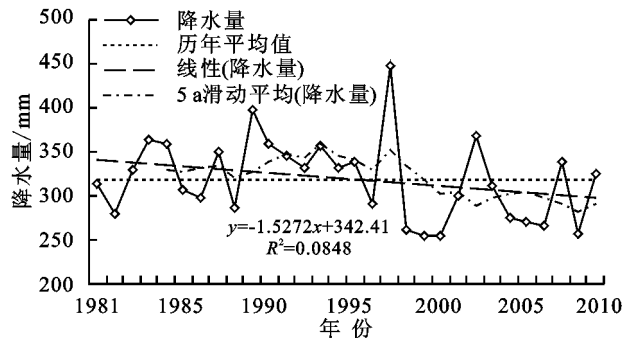


图 2 近 30 a 内蒙古年平均降水量

2.3 干湿气候类型

由年代际变化(图 3A—3C)看出,干旱、半干旱区面积逐年增加,湿润区面积减少趋势明显;极干旱区以上面积主要分布在阿拉善盟;亚(半)湿润区近 10 a 减少趋势明显。特别是近 10 a 亚(半)湿润区面积减少趋势明显,半干旱及以下面积明显增加,其中兴安盟、赤峰市和通辽市部分旗县在 21 世纪后首次进入半干旱区域。整体来看,徐文铎湿润指数更多代表降水和温度的综合影响,与实际下垫面情况比较吻合。

徐文铎湿润指数 30 a 划分结果表明(图 3D),湿润区与内蒙古东北林区分布比较接近;半湿润区与内蒙古兴安岭山脉两侧及阴山北麓和东部前山地区的森林草原结合区比较吻合;极干旱区主要分布在内蒙古典型荒漠区;干旱区主要分布草原化荒漠区及锡盟西北的荒漠化草原区;半干旱区主要分布在通辽大部、赤峰市大部、锡林郭勒盟中部、鄂尔多斯市东部、呼和浩特市和包头市大部,对应植被类型为森林、森林草原区、典型草原、荒漠草原、荒漠。与近 30 a 年平均降水量分布图相比较,干旱区以下面积与 200 mm 降水量分布线一致;半干旱区和半湿润区 300~400 mm 降水量分布线趋同,湿润区在东北与 400 mm 分布线相似。

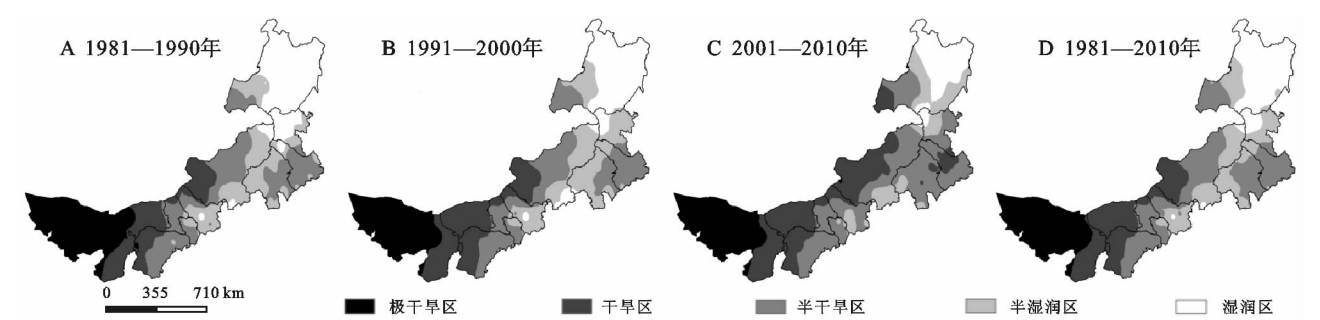


图 3 内蒙古干湿气候类型分布

2.4 净第一性生产力与植被类型

年代际变化特点表明(图 4A—4C),1991—2000 年全区生产力条件较好,近 10 a 气候 NPP 下降明显,从西北到东南阶梯式降低,受其影响较大的地区主要分布在呼伦贝尔市西部的典型草原和温性草甸草原,另外赤峰市和通辽市近 10 a 的 NPP 也下降明显。总的趋势是内蒙古东部区 NPP 下降明显,西部变化不明显,中部偏北地区有进一步下降的趋势,中西部偏南地区周期性波动较大。净第一性生产力分布结果表明,NPP 自东向西逐渐递减(图 4D),NPP 大于 $4.8\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 的地区主要分布在大兴安岭山脉东侧、呼和浩特市南部和鄂尔多斯市东南部。NPP

小于 $4.0\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 的地区主要分布在内蒙古锡林郭勒盟西北、巴彦淖尔市的温性荒漠草原和温性荒漠地区。NPP 分布图与全区下垫面情况比较符合,鄂尔多斯市东南 NPP 分布结果较高,可能跟该地区的近年降水较多和温度偏高共同作用的结果有关。结合温度与降水的分布图来看,内蒙古地区 NPP 主要受降水影响,但东北地区 and 鄂尔多斯市地区同时也受温度的影响。相关分析表明,NPP 与降水相关系数达到 0.930 0,而与温度的相关系数只有一 0.270 0。气温和降水是影响净第一性生产力的主要因素,其在分布上也同时体现了两者的共同作用;相对于温度而言,降水的影响相对大一些。

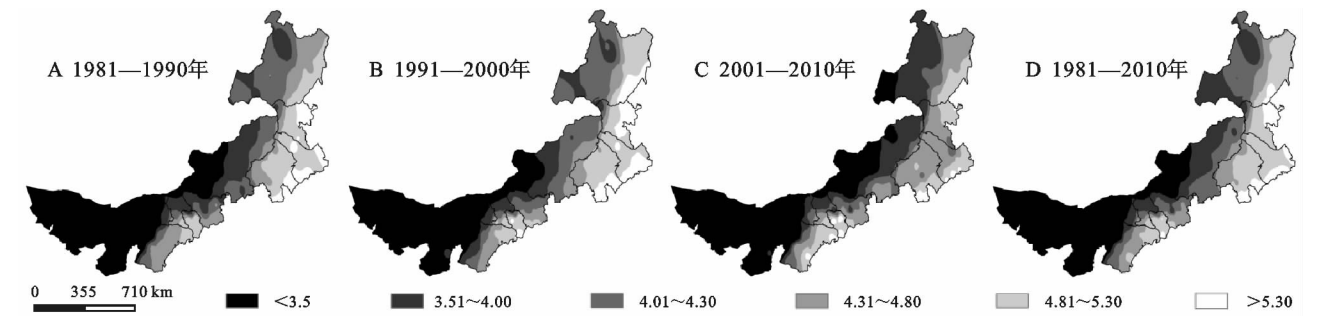


图 4 内蒙古净第一性生产力分布

3 讨论

徐文铎等^[15-18]将 WI 指数和 CI 指数引入中国植被与气候关系的定量研究中,在此基础上提出湿度指数(HI)的概念,并用 WI,CI,HI 这 3 个指数详细研究了东北地区植被与水热条件的关系。实践表明,WI,CI,HI 指数研究水热关系较单一的夏雨型气候区的植被分布较合适,植被类型与水热组合具有较好的拟合关系^[21]。在内蒙古地区的应用结果与植被类型有较好的拟合性;虽然干旱、半干旱区界限有时受到降水影响边界有波动^[22],但整体来看 HI 指数也基本反映了自治区干湿气候变化的特点,说明 HI 指数比较适用于内蒙古地区。

净第一生产力模型是以植被蒸散为基础,综合考虑了各生态因子之间相互作用对 NPP 的限制,适合于中国干旱、半干旱地区草地的 NPP 估算。其特点

是决定 NPP 的环境因子形式简单,在不同区域内得到了验证并被广泛应用;但其缺乏植物生态学内在机制和过程理论基础,忽视了生态系统的复杂过程和功能的变化,模拟出的结果与实际值相比存在误差。如考虑参数过多,结果会导致模型结构比较复杂,总之地区生产力的评估是一个复杂而多变的工作^[23],比如西藏地区 NPP 与温度正相关^[24],而与降水负相关,说明地区不同影响 NPP 的主要因子也不尽相同;也有研究表明与下垫面的植被类型有关,如乔木、灌木、草地其主要的气候影响因子也不相同^[25]。综合各方面的情况,我们认为不同地区和不同植被类型,NPP 大小主要受控于地区植被生长的关键制约因子,干旱区就是水分,严寒区就是温度;这是以后 NPP 研究的关键问题,地区差异明显,要区别对待。能否建立一套完整的评估模型还需在以后工作中不断探索和研究。综合来看,内蒙古地区的净第一生产

力的模型综合考虑了水热因子,所以最高净第一生产力地区不是在湿润指数最高区,而是平衡了热量条件和水热条件的内蒙古东部偏南地区。当前净第一生产力主要考虑了年的水热条件,在对应植被类型的基础上不存在森林植被类型区域净第一生产力一定大于草原区的特点。内蒙古东北地区雨热同期,而草原区生长季阶段干旱明显,东北林区季节性生产力模型一定高于草原区。这也是净第一生产力模型仍需进一步改进的地方,以便更好地评估生长季的地区生产潜力。

4 结 论

近 30 a 湿润区面积占全区面积的 15.33%,半湿润区面积占全区的 20.70%,其余半干旱以下干旱类型面积占 63.97%;全区大部处于干旱、半干旱区。近 30 a 自治区干旱半干旱区面积增加,湿润区面积减少趋势明显;特别是近 10 a 半干旱区和湿润区其波动范围都达到 90 年代面积的 2 倍左右。30 a 气温气候倾向率为 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,降水倾向率为 $-15\text{ mm}/10\text{ a}$;气温呈显著增加的趋势,而降水的下降趋势属正常气候波动。净第一性生产力与降水相关系数达到 0.930 0,而与温度相关系数只有 $-0.270\text{ }0$;相对于温度而言,降水影响相对大一些。净第一性生产力在内蒙古地区大兴安岭山脉东侧、呼和浩特市南部和鄂尔多斯市东南部较高;年代际变化特点表明,内蒙古 NPP 总趋势是东部区下降明显,西部变化不明显,中部偏北地区有进一步下降的趋势,中西部偏南地区周期性波动较大。

参考文献:

- [1] 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1986, 10(4): 16-25.
- [2] 刘迎春. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被—气候(四)几种主要方法与 PEP 程序介绍[R]. 北京: 中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室, 1993.
- [3] 倪健, 宋永昌. 中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种分布与气候的相关分析[J]. 植物生态学报, 1997, 21(2): 114-129.
- [4] 杨正宇. 4 类气候—植被关系模型比较研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2001.
- [5] 张新时. 研究全球变化的植被—气候分类系统[J]. 第四纪研究, 1993, 13(2): 157-169.
- [6] 张新时, 杨奠安, 倪文革. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(三): 几种主要方法与 PEP 程序介绍[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(2): 97-109.
- [7] 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[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 121-129.
- [8] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data[J]. Science, 1947, 105(2727): 367-368.
- [9] 张新时. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(二): 几种主要方法与 PEP 程序介绍[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(4): 197-207.
- [10] Uchiima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations: (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 343-352.
- [11] 郑元润, 周广胜, 张新时, 等. 中国陆地生态系统对全球变化的敏感性研究[J]. 植物学报, 1997, 39(9): 837-840.
- [12] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [13] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11-19.
- [14] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布[J]. 资源科学, 1993, 15(1): 15-21.
- [15] 徐文铎. 吉良的热量指数及其在中国植被中的应用[J]. 生态学杂志, 1985(3): 35-39.
- [16] 徐文铎. 东北主要树种的分布与热量关系的初步研究[J]. 东北林学院学报, 1982(4): 1-10.
- [17] 徐文铎. 东北地带性植被建群种及常见种的分布与水热条件关系的初步研究[J]. 植物学报, 1983(3): 264-273.
- [18] 徐文铎, 常禹. 中国东北地带性顶极植被类型及其预测判别模型: 动态地植物学说的继承与发展(I)[J]. 应用生态学报, 1992, 3(3): 215-222.
- [19] 柳晶, 郑有飞, 赵国强, 等. 郑州植物物候对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1471-1479.
- [20] 黄杏元, 汤勤. 地理信息系统概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [21] 王素萍, 张存杰, 韩永翔. 甘肃省不同气候区蒸发量变化特征及其影响因子研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 675-680.
- [22] 韦振锋, 任志元, 张翀, 等. 1999—2010 年陕甘宁黄十高原区荒漠化空间特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1230-1236.
- [23] 赵学勇, 刘良旭, 王玮, 等. 降水波动对荒漠草原生产力的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1486-1495.
- [24] 功多, 杨秀海, 普布次仁, 等. 西藏 NPP 时空格局与气候因子的关系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 830-836.
- [25] 郭群, 李胜功, 胡中民, 等. 内蒙古温带草原典型草地生态系统生产力对水分在不同时间尺度上的响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 616-623.