

植被变化驱动机制的样带研究

张玉进^{①②}, 周广胜^{①*}

① 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

收稿日期: 2007-11-08; 接受日期: 2008-03-10

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-SW-133)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB400502)资助

摘要 采用以植物功能型为基础的中国气候-植被分类模型, 利用中国 1951~1980 年 30 年的气象数据及全球最低和最高温室气体排放方案下的未来气候情景(SRES-B2 和 SRES-A2), 模拟了中国东北样带和中国东部南北样带的植被分布格局及其变化。结果表明, 植被分布格局在未来气候变化情景下将发生重大变化, 而驱动植被分布格局变化的关键因子是热量和水分, 但是不同植被类型的变化对热量和水分响应程度不同。植被变化对热量的敏感性要大于水分, 未来气候变暖将对植被分布格局产生重大影响。

关键词

驱动机制

植被

陆地样带

植物功能型

气候变化

大气成分变化、地表覆盖变化以及气候变化都将严重影响陆地生物圈的功能^[1], 威胁着维系人类生存与可持续发展的功能基础^[2]。为理解陆地生态系统功能变化的驱动机制, 全球变化的陆地样带作为一种重要的研究手段已被广泛地用于研究全球变化与陆地生态系统的相互作用研究^[3~6]。全球变化的陆地样带是由一系列沿着某种具有控制陆地生态系统结构、功能和组成以及生物圈-大气圈的痕量气体交换和水分循环的全球变化驱动力: 温度、降水和土地利用梯度变化的生态研究站、观测点和研究样地组成的研究平台^[7]。到目前为止, 国际地圈-生物圈计划共设定了 15 条全球变化陆地样带^[6], 其中有两条在中国, 即中国东北样带^[8]和中国东部南北样带^[9]。

目前, 关于全球变化陆地样带的典型植被及生态系统功能对驱动力的响应已有大量研究, 如羊草叶片光合作用与气孔导度特征及其影响因子研究^[10~12]、植物功能型与环境因子关系及其划分指标研究^[13~16]、沿样带驱动力梯度的植被多样性研究^[14,17~21]以及生态系统生产力研究^[22~25]。但是, 关于

植被分布变化的驱动机制及其对于未来气候变化响应的研究仍较少。

本文试图基于水分驱动的中国东北样带和热量驱动的中国东部南北样带, 结合基于植物功能型的植被分类方法(生物群区), 探讨植被分布变化的驱动机制及其对未来气候变化响应, 以增进未来气候变化对植被结构与功能影响的理解, 为制定应对气候变化对策提供依据。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点

研究地点位于中国东北样带(Northeast China Transect, NECT)和中国东部南北样带(Northsouth Transect of Eastern China, NSTEC)。中国东北样带地处 42°~46°N, 110°~132°E, 东西长约 1600 km, 南北宽约 300 km^[5,26]。样带由东向西表现出明显的水分梯度变化, 样带最东端的张广才岭年降水量可达 700 mm, 长白山北坡高处有时可达 800 mm; 中部的农业地区为 580~600 mm, 草甸草原地区为 500 mm; 大兴

安岭南部与内蒙古高原相连地区仅为 250~400 mm, 而样带最西端的荒漠草原地区则少于 200 mm^[2]. 沿样带由东向西, 植被类型有: 温带针阔混交林 (红松 *Pinus koraiensis*, 杉松 *Abies holophylla*); 温带次生落叶阔叶林 (蒙古栎 *Quercus mongolica*); 松辽平原草甸草原 (羊草 *Aneurolepidium*, 贝加尔针茅 *chinenses Stipa baicalensis*, 线叶菊 *Filifolium sibiricum*); 大兴安岭山地灌丛, 山前草甸草, 内蒙古高原典型草原 (羊草 *Leymus chinensis*, 大针茅 *Stipa. grandis*); 荒漠草原 (克氏针茅 *Stipa krylovii*, 戈壁针茅 *Stipa gobica*)^[26,27].

中国东部南北样带主体从东部 108°~118°E 沿经线向北, 到北纬 40°, 然后向东错 10°, 在 118°~128°E 向北到北部国界. 样带南北长约 3700 km, 面积约占国土总面积的三分之一, 形成了世界上独特且完整的以热量驱动的植被连续带^[24]. 从南至北, 植被类型主要有: 热带常绿阔叶林、热带常绿与落叶混交林、亚热带常绿阔叶林、亚热带常绿落叶混交林、亚热带针叶林、暖温带落叶阔叶林、暖温带针叶林、温带针阔混交林、亚热带高山落叶针叶林、温带山地常绿针叶林、寒温带针叶林等^[27]. 沿样带从南向北, 年均温度呈现出逐渐降低趋势. 年均最高温度为 24℃, 出现在海南, 最低温度为 0~4℃, 出现在黑龙江省. 最冷月平均温度也表现出递减趋势, 但是最暖月温度变化不明显. 样带内降水由南向北递减, 长江流域为 1000 mm 左右, 长江流域以南地区为 1000~2000 mm, 以北地区为 600~1000 mm.

1.2 研究方法

翁恩生和周广胜^[28]基于国际植物功能型与生物群区的划分方法, 针对我国独特的季风气候与青藏高原背景下形成的植物功能型及其分布, 建立了中国植物功能型分类体系与中国气候-植被分类模型^[28,29]. 通过比较, 该模型对中国区域植被地理分布 (生物群区) 的模拟结果优于国际著名的 BIOME1 模型^[29].

模型所使用的气候限制因子包括: 最暖月平均温度 (T_w)、最冷月平均温度 (T_c)、最暖月平均温度与最冷月平均温度的差值 (DTY)、大于 0℃ 的有效积温 (GDD_0)、大于 5℃ 的有效积温 (GDD_5) 等热量指标, 以

及年降水 (P) 及反映土壤湿度的湿润指数 (α), 即实际蒸散与潜在蒸散的比值等水分指标.

1.3 数据资料

本研究所用数据主要包括: 植被数据、气象数据和土壤数据. 植被数据主要包括 1:400000 中国植被图^[30]和 1:400000 中国植被区划图^[27]; 气象资料包括来自中国气象局的全国 1951~1980 年 30 a 的气象数据以及未来气候情景. 该气候情景是高学杰等^[31,32]依据区域气候模型 RegCM2/CN 和政府间气候变化专业委员会 (IPCC) 给出的全球最低和最高两种温室气体排放情景 (即 SRES-B2 和 SRES-A2) 模拟的未来 2070~2100 年 30 a 的气候情景; 土壤数据主要是 1:400000 中国土壤图^[33].

2 研究结果

2.1 中国东北样带植被分布及其对未来气候变化的响应

当前气候情景下, 中国东北样带的植被类型主要有 5 类 (图 1), 其中占中国东北样带面积约 45% 的是凉温带混交林 ($309.49 \times 10^3 \text{ km}^2$, 表 1), 主要分布在海拔高度在 500~1200 m 的样带东部. 凉温带针叶林、北方针叶林亦主要分布在样带的东部, 但分布面积 (两者之和约为 $76.44 \times 10^3 \text{ km}^2$) 较凉温带混交林小. 占样带面积较多的是凉温带草原和温带草原, 其面积分别为 207.27×10^3 和 $90.48 \times 10^3 \text{ km}^2$, 主要分布在样带的中部和西部地区. 在未来气候情景 A2 和 B2 下, 北方针叶林向北移出样带, 同时出现了新的植被类型: 温带落叶林, 其面积为 $27.02 \times 10^3 \text{ km}^2$ (情景 B2) 和 $49.342 \times 10^3 \text{ km}^2$ (情景 A2) (图 2). 凉温带混交林、温带草原的面积随气候条件的变化而增加, 但是凉温带针叶林、凉温带草原的面积却有所减少 (表 1).

表 1 不同气候情景下各植被类型面积表 (单位: 10^3 km^2)

生物群区	面积		
	现实	未来情景 B2	未来情景 A2
温带落叶林	—	27.02	49.42
凉温带混交林	309.49	306.11	261.14
凉温带针叶林	67.55	0.36	0.18
北方针叶林	8.89	—	—
温带草原	90.48	305.93	371.35
凉温带草原	207.27	44.26	1.60

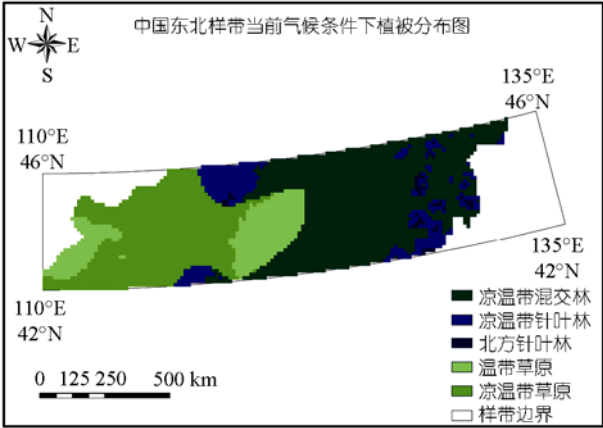


图 1 当前气候条件下中国东北样带植被类型分布

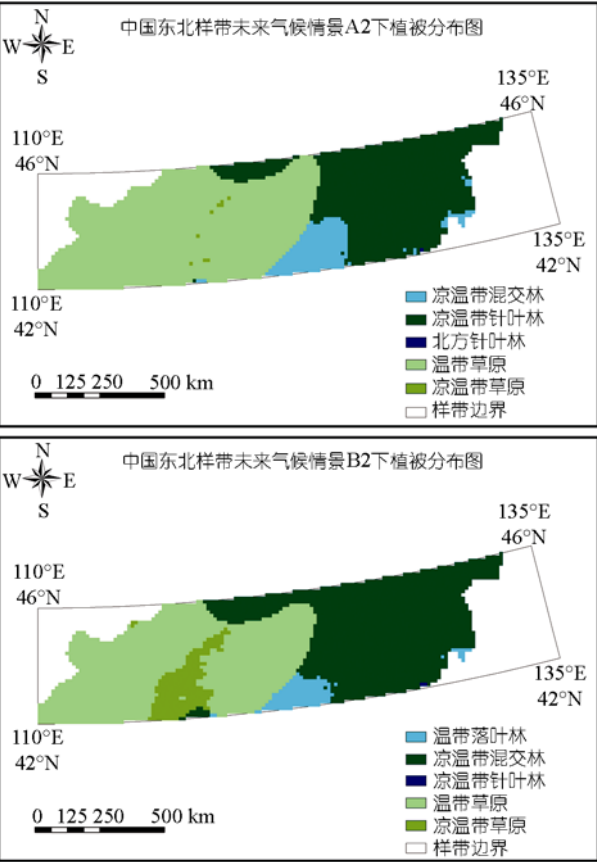


图 2 未来气候情景下中国东北样带植被类型分布

2.2 中国东部南北样带植被分布及其对未来气候变化的响应

中国东部南北样带的植被类型相对较多, 在当前气候条件下样带从南到北主要有 14 类植被(图 3, 表 2)。其中, 热带雨林、热带季雨林、热带干旱森林

3 类植被主要分布在样带的最南部, 其面积之和约 $168.88 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。常绿阔叶与温带落叶混交林面积约 $868.74 \times 10^3 \text{ km}^2$, 约占整个样带面积的 1/3, 是样带中面积最大一类植被。温带落叶森林主要分布在样带的中部地区, 占 1/4 的样带面积, 约 $722.61 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。温带草原、凉温带草原主要分布在样带的中部地区, 分别为 129.95×10^3 和 $84.08 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。凉温带混交林、温带针叶林、北方针叶林、冷温带落叶森林四类植被占据了样带北部的大部分面积, 冷温带落叶林、苔原、高寒荒漠的面积有所减少。在未来气候情景下, 样带内植被的分布及其面积发生了重大的变化(表 2, 图 4), 而苔原植被将从样带中消失。

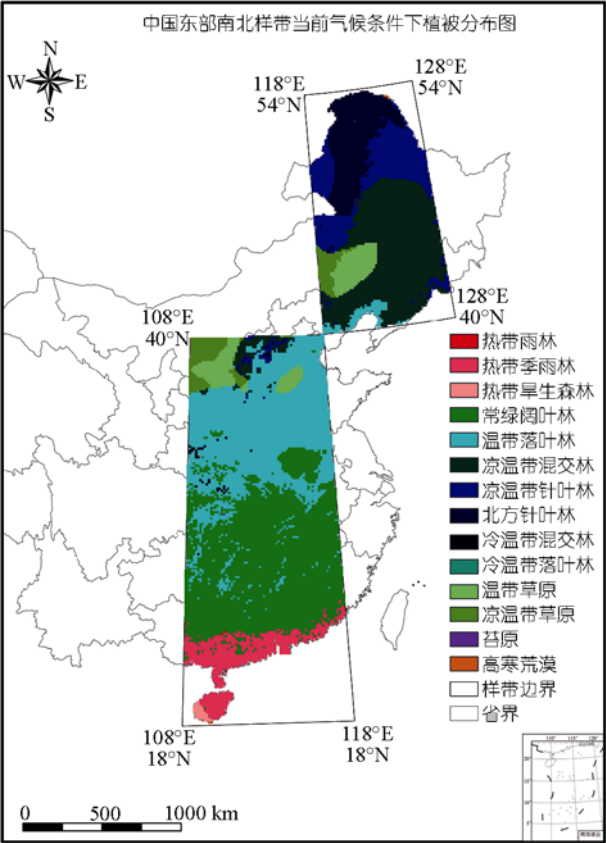


图 3 当前气候条件下中国东部南北样带植被类型分布

3 分析与讨论

3.1 水分对植被分布的驱动机制

水分是限制植物形态的一个重要因素。植被为尽可能多的获取光照, 就需要大的冠层, 但植被冠层越大, 就需要消耗更多的水分^[34-36]。沿中国东北样带

表 2 不同气候情景下中国东部南北样带植被类型面积
(单位: 10^3 km^2)

生物群区	面积		
	现实	未来情景 B2	未来情景 A2
热带雨林	0.36	40.89	42.13
热带季雨林	160.52	240.69	278.73
热带旱生森林	8.00	8.00	9.07
常绿阔叶林	868.74	1097.16	1149.60
温带落叶林	722.61	489.74	372.06
凉温带混交林	467.70	573.47	561.03
凉温带针叶林	241.05	137.06	92.62
北方针叶林	199.27	6.58	0.18
冷温带混交林	5.87	0.18	0.36
冷温带落叶林	0.18	0.36	0.18
干旱疏林/灌木	—	—	2.49
温带草原	129.95	285.13	377.39
凉温带草原	84.08	9.42	2.84
苔原	0.36	—	—
高寒荒漠	1.07	1.07	1.07

由东向西, 植被类型表现出由森林逐渐向草原类型过渡的空间分布格局, 与降水变化趋势相呼应(图 5). 但是, 由于热量的变化也使得沿水分梯度变化的植被分布格局在不同气候条件下发生改变. 当前气候条件下, 以中国东北样带最东端的凉温带混交林与凉温带草原的面积较大, 而在气候情景 B2 下, 凉温带草原的面积大为减小, 温带草原面积大幅度增加, 反映出植被分布格局变化受气候暖干化趋势的影响. 在 A2 气候情景下, 温带草原上升为面积最大的植被类型, 约占整个样带面积 1/2, 而凉温带草原亦已经移出样带范围, 草原面积的增加与森林面积减少反映出植被分布格局较 B2 气候情景下更为强烈的暖干化影响趋势.

为进一步揭示中国东北样带内水分等气候因子对植被格局变化强度的影响, 提取了样带内不同气候条件下各植被类型出现时的气候因子, 分析了气候因子变率(变化的百分率)和各植被类型面积变率的关系(图 6). 沿中国东北样带, 决定植被面积变化程

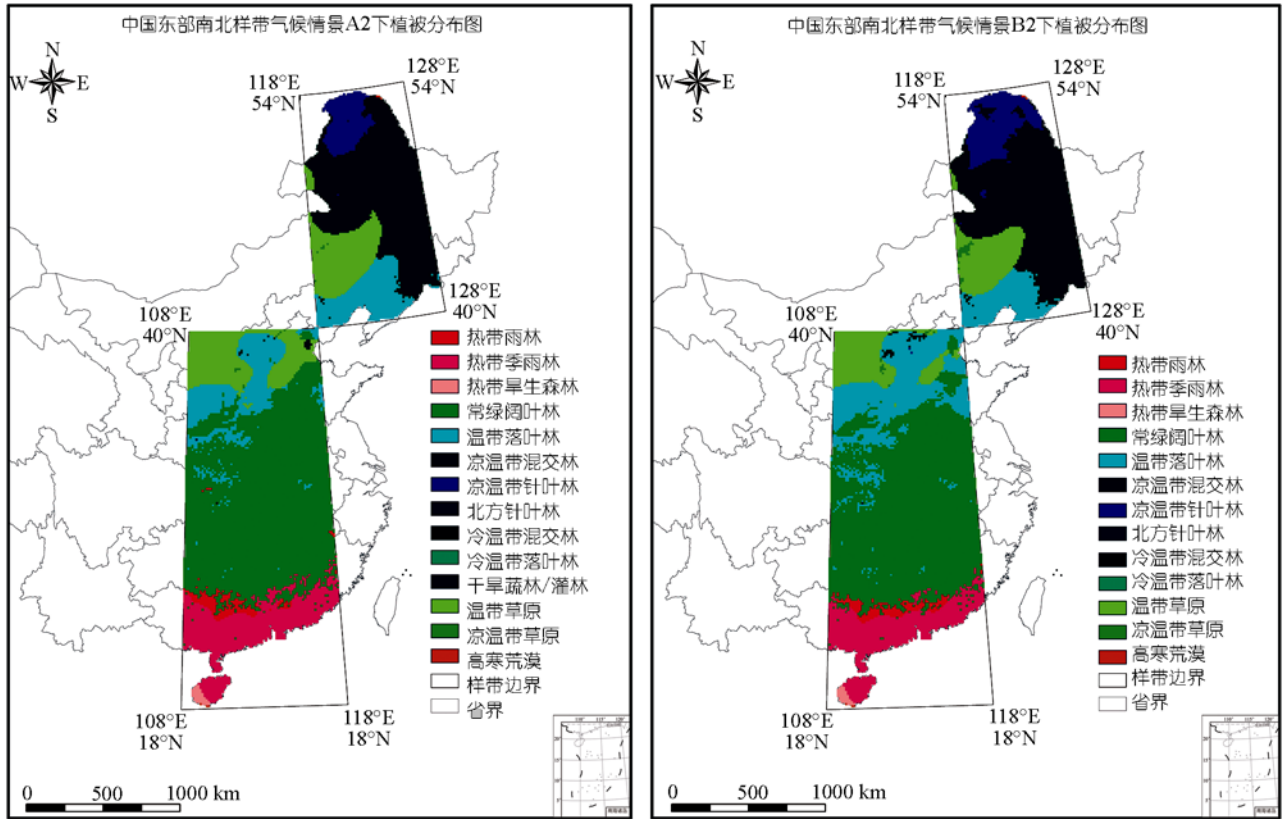


图 4 未来气候情景下中国东部南北样带植被类型分布

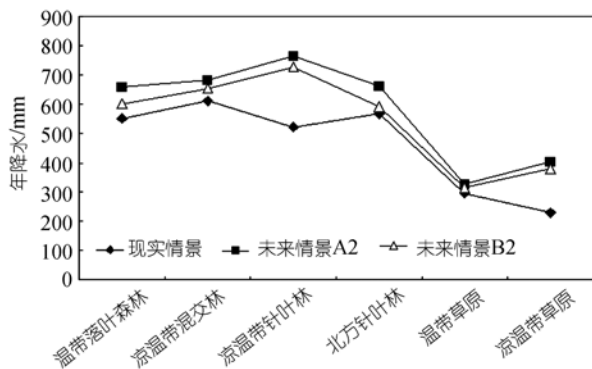


图 5 3 种气候条件下中国东北样带降水量变化趋势

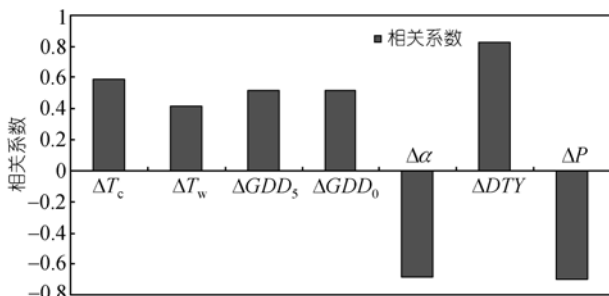


图 6 沿中国东北样带植被分布面积变率与气候因子变率的相关系数

各参数证明见正文. 显著性水平 $P < 0.05$

度的气候因子按影响程度的大小依次为: $\Delta DTY > \Delta P > \Delta \alpha > \Delta T_c > \Delta GDD_0 > \Delta GDD_5 > \Delta T_w$, 其中 ΔDTY 对植被变化的强度影响最大, 表明在温度变化较小的地区, 水分的影响要高于温度, 而在温差较大的地区, 水分的影响要低于温度, 反映出气候变化过程中暖干化对植被的影响.

为探讨两种气候情景下影响中国东北样带植被变化的主导因子, 采用多元逐步回归方法分析了植被面积变率与气候因子变率的关系:

$$\Delta R_{\text{area}} = 3.697 - 8.523\Delta T_c - 76.629\Delta T_w + 32.75\Delta GDD_0 + 42.59\Delta DTY, \quad (1)$$

$$\Delta R_{\text{area}} = 1.549 - 4.507\Delta \alpha - 2.868\Delta P, \quad (2)$$

其中, ΔR_{area} 为各植被类型面积的变率; ΔT_c 为最冷月平均温度变率; ΔT_w 为最暖月平均温度变率; ΔGDD_0 为大于 0°C 的有效积温变率; $\Delta \alpha$ 为实际蒸散与潜在蒸散的比值变率; ΔDTY 为最冷月平均温度与最暖月平均温度的差值变率; ΔP 为年降水量变率. 方程(1)表明植被面积变率与表征温度的各因子的变率具有较

高的相关性, 其相关系数(R^2)达 $0.912(P < 0.05)$; 方程(2)反映出植被面积变率不仅与温度变化密切相关, 而且与水分变化密切相关, 相关系数(R^2)为 $0.603(P < 0.05)$. 这表明, 尽管中国东北样带的植被分布格局取决于水热共同作用, 但水分的影响要小于温度.

3.2 热量对植被分布的驱动机制

中国东部南北样带反映了热量从南向北的梯度变化. 与当前情况相比较, 在气候情景 B2 和 A2 下, 常绿阔叶林、温带落叶林、凉温带混交林 3 种植被类型面积虽然始终保持最大的 3 种类型, 但是其空间分布格局却发生重大变化: 3 种植被的分布范围均向北扩张, 其中常绿阔叶林的北界向北移动最大, 占据了原来温带落叶林的部分区域. 热带旱生森林面积增加, 并出现了新的植被类型: 干旱疏林/灌木. 对样带内的草地植被而言, 未来气候情景下温带草原面积有所增加, 并占据了部分原来凉温带草原的区域.

植物的生长需要满足一定的热量需求, 对森林和草地植被而言, 可采用大于 5°C 的有效积温(GDD_5)作为其生长指标^[37]. 在未来 2 种气候情景下, GDD_5 等值线均有向北移动的趋势(图 7), 样带中的各种植被类型也随之发生变化, 其中温带落叶森林, 凉温带混交林, 冷温带混交林、北方针叶林等类型的移动最为明显, 以至于在气候情景 A2 下, 样带内部凉温带混交林和北方针叶林面积大为减少, 而冷温带混交林、苔原则从样带中消失. 这表明, 样带内热量变化是影响植被分布和变化的重要驱动因子.

为揭示中国东部南北样带植被类型的面积变化强度与热量等气候因子的关系, 提取样带内不同气候条件下各植被类型的面积及其气候因子, 给出了气候变化情景下植被面积变率与气候变率(变化的百分率)的关系(图 8).

沿中国东部南北样带, 影响植被面积变化的气候因子按影响程度依次为: $\Delta \alpha > \Delta T_w > \Delta P > \Delta T_c > \Delta GDD_0 > \Delta GDD_5 > \Delta DTY$, 反映出水分变化对植被类型变化有着重要影响. 植被面积变率与各气候因子变率的逐步回归法分析关系如下:

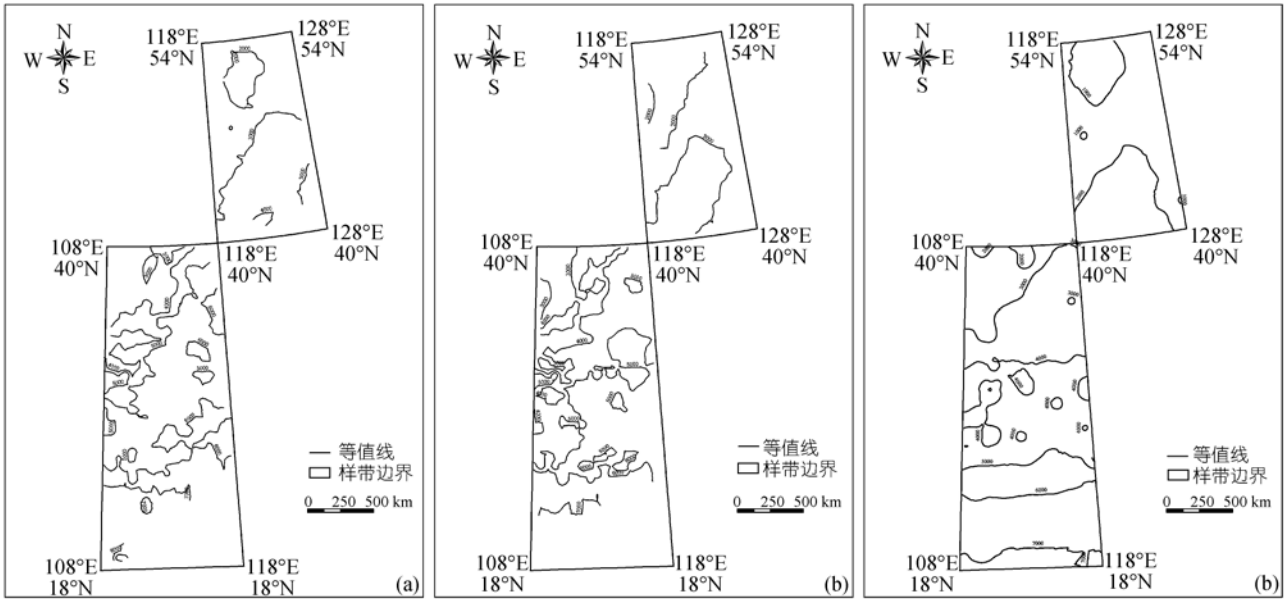


图7 不同气候条件下中国东部南北样带大于5℃的有效积温(GDD_5)等值线图
(a) 当前气候情景; (b) 未来气候情景 B2; (c) 未来气候情景 A2

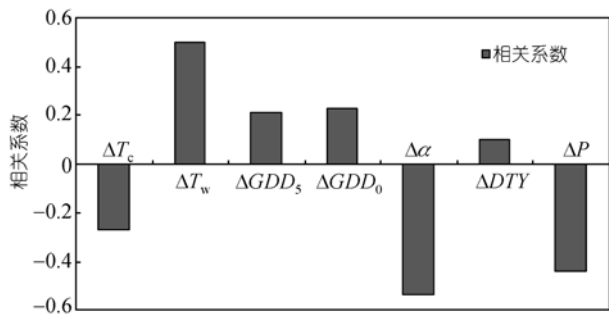


图8 不同气候条件下中国东部南北样带植被类型面积变率与气候因子变率的相关系数
显著性水平 $P<0.05$

$$\Delta R_{\text{area}} = -0.105 - 2.892\Delta T_c + 8.296\Delta T_w - 11.6\Delta GDD_5 + 14.213\Delta GDD_0 + 3.949\Delta DTY, \quad (3)$$
$$\Delta R_{\text{area}} = -0.044 - 5.387\Delta \alpha + 0.72\Delta P, \quad (4)$$
方程(3)和(4)中各指标所代表的意义同方程(1)和(2). 方程(3)和(4)的结果表明, 热量因子变率(相关系数 R^2 达 0.639, $P<0.05$)较水分因子变率(相关系数 R^2 达 0.542, $P<0.05$)对植被面积变率的影响更大. 虽然与中国东北样带相比, 热量变率的影响有所降低, 但仍在植被变化中起着主导作用.

4 结论

通过对中国东北样带以及中国东部南北样带在当前以及未来气候情景下的植被分布及引起植被分布变化的驱动因子分析, 主要得到如下结论:

(1) 水分和热量是影响植被分布和变化的关键因子, 然而, 水分和热量对植被的影响是不同的. 水分决定着植被的分布格局, 而热量则在植被的变化中起着主要的作用. 水分决定着植被类型的变化, 随着水分由多到少, 植被类型由高大的乔木逐渐向低矮的灌木过度, 而热量对植被类型变化的影响则不明显.

(2) 在未来气候情景下, 植被分布面积的变化对水分和热量变化的响应是不同的. 水分对植被面积变化的影响在不同地区表现有所差异. 在温度变化较小的地区, 水分对植被的影响要高于温度, 而在温度变化较大的地区, 水分的影响要低于温度.

(3) 在未来气候情景下, 森林分布面积的减少以及草原分布面积的增加, 反映出未来气候较当前气候更为强烈的暖干化趋势及未来气候变化对植被变化的强烈影响.

参考文献

- 1 Leeman R. The use of plant functional type classifications to model global land cover and simulate the interactions between the terrestrial biosphere and atmosphere. In: Smith T M, Shugart H H, Woodward F I, eds. *Plant Functional Types-Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 289—316
- 2 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲. 全球变化与中国东北样带(NECT). *地学前缘*, 2002, 9(1): 198—215
- 3 Koch G W, Scholes R J, Steffen W L, et al. The IGBP Terrestrial Transects: Science Plan. International Biosphere-Geosphere Programme (IGBP). Stockholm, 1995. 61
- 4 Box E O. Plant functional types and climate and the global scale. *J Veg Sci*, 1996, 7: 309—320[DOI]
- 5 Steffen W L, Scholes R J, Valentin C, et al. The IGBP Terrestrial transects. In: Walker B H, Steffen W L, Canadell J, et al, eds. *The Terrestrial biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 66—87
- 6 Canadell J G, Steffen W L, White P S. IGBP/GCTE terrestrial transects: dynamics of terrestrial ecosystems under environmental change. *J Veg Sci*, 2002, 13: 298—300[DOI]
- 7 Koch G W, Scholes R J, Steffen W L, et al. The IGBP terrestrial transects: science plan. IGBP Report, 1995, 36: 130—141
- 8 Zhang X S, Gao Q, Yang D A, et al. A gradient analysis and prediction on the Northeast China Transect (NECT) for global change study. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39: 785—799
- 9 Peng S L, Ren H. The North-South Transect of Eastern China (NSTEC) for global changes studies. *GCTE News*, 2000, 16: 6
- 10 王玉辉, 周广胜. 两种土壤类型对羊草生物学特性的影响. *草地学报*, 2000, 8(3): 267—272
- 11 王玉辉, 周广胜. 羊草叶片气孔导度对环境因子的响应模拟. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 739—743
- 12 王玉辉, 周广胜. 松嫩草地羊草叶片光合作用生理生态特征分析. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 75—79
- 13 唐海萍. 中国东北样带(NECT)的 C-4 植物分别及其与环境因子的相关性. *科学通报*, 1999, 44(4): 416—420
- 14 Tang H P, Zhang X S. A new approach to distinguishing photosynthetic types of plants: a case study in Northeast China Transect (NECT) platform. *Photosynthetica*, 1999, 37: 97—106[DOI]
- 15 Jiang G M, Tang H P, Yu M, et al. Response of photosynthesis of different plant functional types to environmental changes along Northeast China Transect. *Trees*, 1999, 14: 72—82[DOI]
- 16 Wang R Z. Photosynthetic pathways and life forms in different grassland types from North China. *Photosynthetica*, 2002, 40: 243—250[DOI]
- 17 岳天祥, 周成虎, 李振清, 等. 生物多样性模型的理论分析. *地球信息科学*, 1999, 1: 19—25
- 18 李振清. 中国东北样带(NECT)植物群落复杂性与多样性研究. *植物学报*, 2000, 42(9): 971—978
- 19 Ni J, Zhang X S. Climate variability, ecological gradient and the Northeast China Transect (NSTEC). *J Arid Environ*, 2000, 46: 313—325[DOI]
- 20 Ni J. A biome classification of China based on plant functional types and the BIOME3 model. *Folia Geobotanica*, 2001, 36: 113—129[DOI]
- 21 Ni J. Plant functional types and climate along a precipitation gradient in temperate grasslands, Northeast China and Southeast Mongolia. *J Arid Environ*, 2003, 53: 501—516[DOI]
- 22 Wang R Z, Gao Q. Climate-driven changes in shoot density and shoot biomass in *Leymus chinensis* (Poaceae) on the North-east China Transect (NSTEC). *Global Eco Biogeogr*, 2003, 12: 249—259[DOI]
- 23 Wang R Z, Gao Q, Chen Q S. Effects of climatic change on biomass allocation in *Leymus chinensis* (Poaceae) along the Northeast China Transect (NECT). *J Arid Environ*, 2003, 54: 653—665
- 24 彭少麟, 赵平, 任海, 等. 全球变化压力下中国东部样带植被与农业生态系统格局的可能性变化. *地学前缘*, 2002, 9(1): 217—226
- 25 Gao Q, Li X B, Yang X S. Responses of vegetation and primary production in north-south transect of eastern China to global change under land use constraint. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(11): 1274—1284
- 26 张新时, 高琼, 杨莫安, 等. 中国东北样带的梯度分析及预测. *植物学报*, 1997, 39(9): 785—799
- 27 吴征镒. *中国植被*. 北京: 科学出版社. 1980

- 28 翁恩生, 周广胜. 用于全球变化研究的中国植物功能型划分. 植物生态学报, 2005, 29(1): 81—97
- 29 Weng E S, Zhou G S. Modeling distribution changes of vegetation in China under climate change. Environ Mod Assess, 2006, 11(1): 45—58 [DOI](#)
- 30 候学煜. 中华人民共和国植被图. 北京: 地图出版社, 1982
- 31 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I: 模式对中国气候模拟能力的检验. 气象学报, 2003, 61: 20—28
- 32 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II: 中国区域气候的可能变化. 气象学报, 2003, 61: 29—38
- 33 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1978
- 34 Woodward F I. Climate and Plant Distribution. Cambridge: Cambridge University Press, 1987
- 35 Woodward F I, McKee I F. Vegetation and climate. Environ Int, 1991, 17: 535—546 [DOI](#)
- 36 Yates D N, Kittel T G F, Cannon R F. Comparing the correlative Holdridge models to mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to climatic change. Clim Change, 2000, 44: 59—87 [DOI](#)
- 37 Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, et al. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. J Biogeography, 1992, 19: 117—134 [DOI](#)