

# 低温雪灾对莽山保护区植被 NPP 影响的遥感评价

张宝雷<sup>1</sup>, 胡文秋<sup>1</sup>, 冯朝阳<sup>2</sup>, 郑智荣<sup>2</sup>, 吕世海<sup>2</sup>

(1. 山东师范大学 人口·资源与环境学院, 济南 250014; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 低温雪灾对植被的影响不仅体现在对植被外在植株的损害上, 还体现在对植物内在生理活动的破坏方面。因此, 低温雪灾对植被影响的评价应立足植被恢复较长一段时间的植被变化。以 2008 年 1 月的低温雪灾为背景, 选择反映植被生长特性的植被净初级生产力为研究对象, 以受人类活动干扰程度较小、能较好地体现植被自然恢复的莽山保护区为研究区, 构建了光能利用率模型(CASA 模型), 对低温雨雪灾害发生前和发生两年后的植被净初级生产力进行了估算, 通过其变化情况来衡量低温雨雪对植被的影响。还对不同地形条件下、不同林龄和树种的植被 NPP 受低温雪灾影响的差异进行分析, 以期对整个莽山乃至南方受灾地区灾后评价和重建决策提供数据支持。

**关键词:** 低温雪灾; 植被净初级生产力; 遥感评价; 莽山保护区

中图分类号: S718.55+6; P426.63

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0097-04

## Evaluation on Effect of Snowstorm on Vegetation NPP in the Protected Area of Mangshan Based on Remote Sensing

ZHANG Bao-lei<sup>1</sup>, HU Wen-qiu<sup>1</sup>, FENG Chao-yang<sup>2</sup>, ZHENG Zhi-rong<sup>2</sup>, LÜ Shi-hai<sup>2</sup>

(1. College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The effect of snowstorm on plants is expressed not only the external damage, but also the inherent physiological activities. Therefore, the evaluation of the impact of vegetation restoration should be based on a longer period of vegetation changes. Taking the snowstorm in January 2008 as the case, the paper chose the vegetation net primary productivity (NPP) that reflected the ability of vegetation productivity as indicator and selected Mangshan protected area with less effect by human activities as study area. The paper built light use efficiency model based on the CASA model, estimated the NPP of the year before the snowstorm and two years after it, and evaluated the effect of snowstorm on vegetation and changes of plant NPP. The paper also analyzed the effect of snowstorm on vegetation in the aspect of different terrain, different ages and different species, so as to provide data support for the decision-making of post-disaster assessment and reconstruction in Mangshan protected area and even the south disaster area.

**Key words:** snow storm; vegetation NPP; elevation based on remote sensing; Mangshan protected area

2008 年 1 月中下旬至 2 月上旬, 我国南方地区气候异常, 导致大范围、长时间的强降雪及冰冻灾害, 这场强降雪给受灾地区的植被生态系统带来了严重破坏。由于雪灾的机械损伤和随后的冰冻对植物代谢的损害, 加之土壤结冰严重, 土温极低且持续时间长, 容易导致植物生理代谢的过程受损, 所带来的损害会超过机械损伤造成的伤害。因此, 冰冻雨雪的灾害不仅表现在外在的植株弯、折、断、倒等, 还表现为植物内部生理活性的破坏。所以, 对于冰冻雨雪灾害

对植被生态系统破坏的评估, 不能只局限在灾后野外调查的外在景象上, 还应体现在其后相当长时间内对植被生理代谢和生长恢复的影响上。近年来遥感技术在植被生长特性反演监测方面的巨大发展, 为本研究提供了重要的技术支持。

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指植被在单位时间、单位面积上所积累的有机物的数量<sup>[1]</sup>, 它反映了植物群落在自然环境条件下的生产能力<sup>[2]</sup>。本文选择受人类活动干扰程度较小、

能较好体现植被自然恢复的湖南省莽山保护区为研究区,通过分析植被的净初级生产力在雪灾前后的变化,来研究雪灾对植被的影响程度,以期为灾后重建和植被生态系统保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

莽山位于湖南省郴州最南端,是我国南方面积最大、生物物种保存最完好的国家森林公园,也是地球同纬度区保存最完好的原始森林,至今仍保存有 6 000 hm<sup>2</sup> 的原始森林。莽山属亚热带湿润气候,年均气温 17.2℃,尤其在海拔 900 m 以上的地带,冬无严寒、夏无酷暑。初霜期在 10 月上旬,终霜期在 2 月中旬,每年 12 月至翌年 2 月间常有冰雪。冰冻期一般为 4~5 d,最长达 15 d。莽山的年降雨量平均有 1 700 mm 以上,但多集中在 4~6 月。

莽山自然保护区地处南亚热带和中亚热带植物交替的过渡地区,生物地理位置特殊,是南北植物荟萃之地,区内的原生性亚热带常绿阔叶林是世界湿润亚热带常绿阔叶林保存最完好、面积较大、最具代表性的地域。本区植物种类繁多,组成复杂,有高等植物 2 314 种,其中国家保护植物 21 种。动物有兽类 57 种、鸟类 111 种、两栖类 33 种、爬行类 48 种、昆虫 619 种,其中国家重点保护动物 32 种。莽山自然保护区被中外专家称为“天然动植物博物馆”和“生物基因库”,是国务院批准的国家级自然保护区。

## 2 数据基础

由于莽山地区的植被具有亚热带和温带性质,且以亚热带性质占优势,植被组成主要是马尾松林、杉木林和常绿阔叶林,这 3 类树种在一年四季都能生长,因此,季相对评价雪灾前后植被 NPP 的影响较小。由于雪灾发生在 2008 年 1 月,为更好的反映雪灾对植被 NPP 的影响,本文尽量选择雪灾发生前后的遥感影像为参照,最终选择 2006 年 12 月的 TM 卫星影像来反映雪灾影响前的植被状态,以 2009 年 12 月 17 日的 TM 卫星影像来反映灾后植被恢复两年的状态。

## 3 研究方法

### 3.1 植被 NPP 评价

在区域和全球尺度上,人们无法直接全面地进行 NPP 的测量,利用模型模拟间接估测就成为一种重要且被广泛接受的研究方法<sup>[3]</sup>。有学者根据 NPP 和气候之间的统计关系,建立了 NPP 的气候估算模型<sup>[47]</sup>,还有学者根据植物生长和发育的过程和特征,

并结合气候及土壤物理数据,建立了 NPP 估算的生态过程模型<sup>[7-11]</sup>。随着遥感和计算机技术的发展,利用遥感模型进行 NPP 估算已深入到许多领域,有的直接用植被指数与 NPP 的关系进行计算<sup>[12-14]</sup>。

在众多的模型中,基于光能利用率原理的 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型具有坚实的理论基础,已被广泛用于区域陆地植被净初级生产力<sup>[15-17]</sup>、全球碳循环和农作物产量的评估。本研究结合研究区实际情况,考虑了温度、大气和水汽的影响,构建 CASA 模型来估算植被净初级生产力。该生产力模型可表示为:

$$NPP = fAPAR \times PAR \times T_{\theta} \times T_{\epsilon} \times W_{\epsilon} \times \epsilon^* \quad (1)$$

式中:  $fAPAR$ ——植被对光合有效辐射的吸收比例;  $PAR$ ——到达植被的光合有效辐射;  $T_{\theta}$ ,  $T_{\epsilon}$ ——温度胁迫系数;  $W_{\epsilon}$ ——水分胁迫系数;  $\epsilon^*$ ——最大光能转化率,本模型中取值为 0.389 g/MJ<sup>[18]</sup>。

$PAR$  表示到达植被的光合有效辐射,由陆地表面太阳辐射  $R_s$  乘以 0.5 得到,而陆地表面太阳辐射与植被所在位置有关,其计算公式如式(2)。

$$R_s = R_0(a + bS), \quad a = 0.248, \quad b = 0.752$$

$$R_0 = 0.47 \times (c_0 + c_1\varphi + c_2H + c_3E) \quad (2)$$

式中:  $S$ ——日照率;  $\varphi$ ,  $H$ ,  $E$ ——地理纬度、海拔高度和地面水汽压;  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ——常数,不同月份其取值也不相同<sup>[17]</sup>。

$fAPAR$  反映了植被对  $PAR$  的吸收程度,其计算采用式(3)。

$$fAPAR = \{fAPAR_{SR} + (1-f) \times APAR_{NDVI}\} / 2$$

$$fAPAR_{SR} = \left\{ \frac{(SR - SR_{min})}{(SR_{max} - SR_{min})} \right\} \times (fAPAR_{max} - fAPAR_{min}) + fAPAR_{min}$$

$$fAPAR_{NDVI} = \left\{ \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \right\} \times (fAPAR_{max} - fAPAR_{min}) + fAPAR_{min}$$

$$SR = (1 + NDVI) / (1 - NDVI)$$

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{VIS}) / (R_{NIR} + R_{VIS}) \quad (3)$$

式中:  $fAPAR_{SR}$ ——植被直接吸收程度;  $APAR_{NDVI}$ ——土壤反射后的植被二次吸收程度;  $SR$ ——比值植被指数,由植被类型确定;  $NDVI$ ——归一化植被指数,也由植被类型确定;  $R_{NIR}$ ,  $R_{VIS}$ ——遥感影像的近红外和可见光波段。

温度胁迫系数  $T_{\theta}$  反映了在低温和高温时植物内在的生化作用对光合的限制而降低了净初级生产力,可采用式(4)计算。

$$T_{\theta} = 0.8 + 0.02T_{opt} - 0.0005T_{opt}^2 \quad (4)$$

式中:  $T_{opt}$ ——某一区域一年内 NDVI 值达到最高时月份的平均气温。当某一月平均温度小于或等于

- 5℃时,  $T\epsilon$  取 0。  $T\epsilon$  是  $T_{opt}$  的函数, 它的变异只有空间性没有时间性, 值介于 0.8 ( $T_{opt}$  为 0 或 40℃) 到 1 ( $T_{opt}$  为 1 或 20℃) 之间。

温度胁迫系数  $T\epsilon$  表示环境温度从最适宜温度  $T_{opt}$  向高温和低温变化时植物的光能转化率逐渐变小的趋势, 可采用式 (5) 计算。

$$T\epsilon = 1.1919 / \{1 + e^{[0.2(T_{opt} - 10 - T)]}\} / \{1 + e^{[0.3(-T_{opt} - 10 + T)]}\} \quad (5)$$

当某一月平均温度  $T$  比最适宜温度  $T_{opt}$  高 10℃ 或低 13℃ 时, 该月的  $T\epsilon$  值等于月平均温度  $T$  为最适宜温度  $T_{opt}$  时  $T\epsilon$  值的一半。

水分胁迫影响系数  $W\epsilon$  反映了植物所能利用的有效水分条件对光能转化率的影响。随着环境有效水分的增加,  $W\epsilon$  逐渐增大。它的取值范围为 0.5 (在极端干旱条件下) 到 1 (非常湿润条件下)。

$$W\epsilon = 0.5 + 0.5 \times (EET / PET) \quad (6)$$

式中: PET ——可能蒸散量 (mm), 是温度和纬度的函数, 由 Thornthwaite 公式计算<sup>[19]</sup>, 即:

$$PET = 2037.98 - 18.8308LAT - 4.5801LOG - 0.157861ALT \quad (7)$$

式中: LAT ——纬度值; LOG ——经度值; ALT ——海拔值。

估计蒸散 EET (mm) 包括降水和土壤蒸发, 土壤蒸发速率是由前一时间段的土壤湿度决定, 水分胁迫影响系数体现了弱的干湿缓冲过渡效应。

$$EET = BT \times 58.93 / r \quad (8)$$

式中: BT ——月平均温度;  $r$  ——月平均降水。当 EET 大于 PET, NPP 不再受土壤湿度的制约, 水分胁迫影响系数等于 1。而当月平均温度小于或等于 0℃ 时, 该月的  $W\epsilon(t)$  等于前一个月的值, 即  $W\epsilon(t-1)$ 。

本研究 NPP 评估的流程, 如图 1。

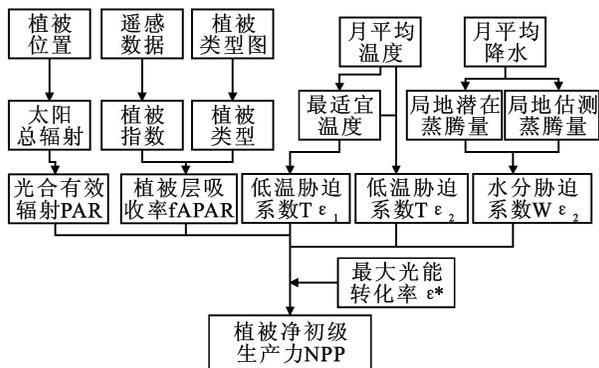


图 1 NPP 估算的流程

### 3.2 植被 NPP 变化分析

影响植被 NPP 的主要因素为人类活动和气候变化, 但是在莽山自然保护区人类活动很少, 而气候变

化的影响是长期积累的过程, 因此, 在 1~ 2 a 的时间里, 莽山自然保护区的植被生长过程可以看成是一个在雪灾影响后的自然恢复过程。本研究采用植被 NPP 的变化率来表现雪灾的影响, 其计算公式为:

$$V = (NPP_{2006} - NPP_{2009}) / NPP_{2006} \quad (9)$$

式中:  $V$  ——植被 NPP 变化率;  $NPP_{2006}$ ,  $NPP_{2009}$  —— 2006 年和 2009 年的植被 NPP。

为了更好的确定雪灾对植被 NPP 的影响, 将植被 NPP 变化率小于 0 的像元值统一取 0 值, 然后按照表 1 所列标准进行影响程度分级。

表 1 雪灾对植被 NPP 影响程度分级

分级名称	微度影响	轻度影响	中度影响	强度影响	极强影响
分级范围/ %	0~ 15	15~ 30	30~ 45	45~ 60	> 60

## 4 雪灾对植被 NPP 的影响

以林业调查的林地图斑为单位 (比例尺 1: 1 万), 将植被 NPP 的变化率分级, 形成低温雪灾对植被 NPP 影响程度分级图 (附图 8)。由附图 8 可以看出, 雪灾对莽山自然保护区植被 NPP 的影响主要是以轻度影响为主, 强度和极强度影响区主要集中在莽山自然保护区东北部。将各种影响程度区的面积进行统计可知, 微度影响区、轻度影响区、中度影响区、强度影响区和极强影响区的面积比重分别为 16.21%、53.69%、22.37%、5.34% 和 2.39%。

### 4.1 不同地形条件下雪灾对植被 NPP 的影响

以研究区 1: 1 万的地形图为基础, 经过坐标纠正后通过手工数字化的方式获取研究区的等高线, 然后生成了研究区的 1: 1 万 DEM 图和坡度图, 并以北方向为 0°, 获取了研究区的坡向图。对植被 NPP 变化率在不同坡向、坡度和高程上的变化进行分级统计 (表 2 和表 3), 可以看出:

(1) 在阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡上, 低温雪灾对植被 NPP 影响程度呈现阳坡 > 半阳坡 > 半阴坡 > 阴坡的现象; 各个坡向方位上雪灾对植被 NPP 影响总体差别不大, NPP 的变化率总体上在 20% ~ 30% 之间, 但在南、东南、东和西南方向上影响较大, 在北、西北、东、东北方向上影响较小。

(2) 雪灾对植被 NPP 的影响在 0~ 2° 坡度范围内最小, 随着坡度增大影响程度逐渐增大。

(3) 雪灾对植被 NPP 的影响在 700~ 1 000 m 的范围上最大, 当海拔超过 1 250 m 以上时, 呈现随海拔升高影响程度减少的趋势, 这与高海拔的植物有更强的耐寒适寒的特性有关。

表 2 不同坡向条件下雪灾对植被 NPP 的影响

坡向	角度/(°)	NPP 变化率/%	影响程度	方位	角度/(°)	NPP 变化率/%	影响程度
阳坡	135~ 225	30.34	中度	北	0~ 22.5, 337.5~ 360	22.65	轻度
				东北	22.5~ 67.5	25.32	轻度
半阳坡	90~ 135, 225~ 270	26.68	轻度	东	67.5~ 112.5	27.20	轻度
				东南	112.5~ 157.5	29.28	轻度
半阴坡	270~ 315, 45~ 90	24.8	轻度	南	157.5~ 202.5	30.47	中度
				西南	202.5~ 247.5	27.81	轻度
阴坡	0~ 45, 315~ 360	23.03	轻度	西	247.5~ 292.5	24.44	轻度
				西北	292.5~ 337.5	22.61	轻度

表 3 不同坡度或海拔条件下雪灾对植被 NPP 影响

坡度分级/ (°)	NPP 变化率/%	影响程度	高程分级/ m	NPP 变化率/%	影响程度
0~ 2	22.50	轻度	400~ 700	27.85	轻度
2~ 6	23.26	轻度	700~ 1000	28.95	轻度
6~ 15	24.87	轻度	1000~ 1250	27.52	轻度
15~ 25	26.11	轻度	1250~ 1500	22.58	轻度
> 25	27.25	轻度	> 1500	19.84	轻度

#### 4.2 雪灾对不同林种植被 NPP 的影响

将研究区植被 NPP 变化率根据不同的林组和林龄分类统计,可得表 4。由表 4 可以看出,雪灾对植被 NPP 的影响程度最大是马尾松林,其次是杉木林,最后是常绿阔叶林。雪灾对不同林种内部不同林龄的影响程度差异较大。对于马尾松组来说,雪灾对中龄林和近熟林的影响程度相对较小,而对幼龄林、成熟林和过熟林的影响程度相对较大。对于杉木组来说,雪灾对过熟林影响最小,对成熟林影响最大。对于常绿阔叶林来说,雪灾对中龄林和近熟林的影响相对较小,而对成熟林和过熟林的影响相对较大。

表 4 雪灾对不同林种和林龄植被 NPP 的影响

林组	NPP 变化率/%	影响程度	林龄	NPP 变化率/%	影响程度
马尾松	29.91	轻度	幼龄林	32.91	中度
			中龄林	22.50	轻度
			近熟林	27.75	轻度
			成熟林	33.52	中度
			过熟林	32.74	中度
杉木	25.82	轻度	幼龄林	24.98	轻度
			中龄林	24.92	轻度
			近熟林	23.45	轻度
			成熟林	26.82	轻度
			过熟林	21.79	轻度
常绿阔叶林	24.75	轻度	幼龄林	25.04	轻度
			中龄林	23.72	轻度
			近熟林	24.18	轻度
			成熟林	26.04	轻度
			过熟林	27.24	轻度

## 5 结论

(1) 冰冻、雨雪灾害对植被生态系统影响体现在

其后相当长时间内对植被生理代谢和生长恢复上,本研究表明植被经过两年恢复后,仍未完全消除低温雪灾的影响。

(2) 用改进的 CASA 模型来计算月均植被净初级生产力,比传统思路下的植被净初级生产力年累计值计算,更能发挥遥感实时性监测的优势。

(3) 雪灾对莽山保护区植被 NPP 的影响程度以轻度影响为主,中强度以上的影响区所占比重为 30.10%,极强度影响区占 2.39%。这说明低温雪灾发生两年后,大部分植物能够自然恢复到以前的状态,但是仍有部分植物需要更长的时间来恢复。

(4) 不同地形条件下、不同林种和林龄的植被 NPP 受低温雪灾的影响有所差异。低温雪灾对阴坡植被 NPP 的影响程度较阳坡大,并有随坡度增大影响程度呈现增大的趋势。随海拔的升高,低温雪灾对植被 NPP 的影响程度有降低的趋势。从林种上看,雪灾对植被 NPP 的影响程度最大的是马尾松林,其次是杉木林,最后是常绿阔叶林。另外,低温雪灾对不同林种内部不同林龄的影响程度差异也较大。

#### 参考文献:

- [1] Liu J, Chen J M, Chen W. Net Primary Productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(22): 27735-27754.
- [2] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components[J]. Science, 1998, 281: 237-240.
- [3] Cramer W. Coauthors. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results[J]. Global Change Bio, 1999( S1): F15.
- [4] ZHU Zhihui. The Model of Net Primary Productivity of vegetation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [5] 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.

(下转第 106 页)

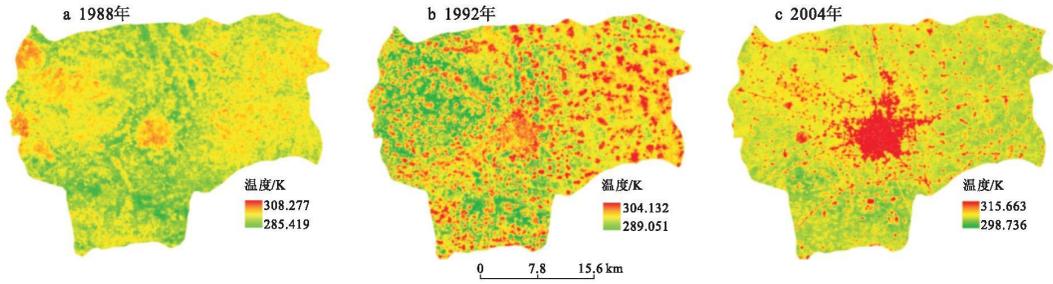
市居住用地集约利用处于适度利用水平, 集约利用类型土地占 3.04%, 适度利用类型土地占 61.84%, 低度利用类型土地占 35.12%。西宁市居住用地集约利用潜力较大, 绝对规模潜力为 2 918.65 hm<sup>2</sup>, 相对规模潜力为 62.54%; 保留现有物业, 利用空闲地进行挖潜的经济潜力为 18 221.20 万元, 单位经济潜力为 3 615.32 元/m<sup>2</sup>; 进行部分改造, 部分拆除现有物业进行挖潜的经济潜力为 53 295.38 万元, 单位经济潜力为 806.65 元/m<sup>2</sup>。

为进一步提高西宁市居住用地集约利用程度, 一要科学制定规划, 提高居住用地容积率, 提高土地利用效率; 二要加强用地管理, 严格控制土地供应量, 规范土地供应管理; 要强化市场机制, 有效配置土地, 促进居住用地节约利用。

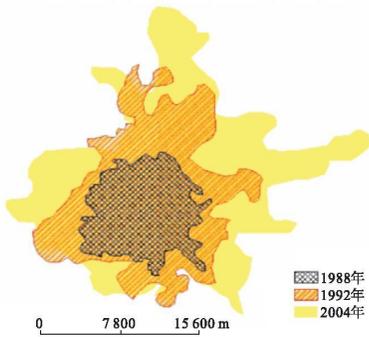
#### 参考文献:

- [1] 邵晓梅, 刘庆, 张衍毓. 土地集约利用的研究进展及展望 [J]. 地理科学进展, 2006, 25(2): 85-95.
- [2] 谢敏, 郝晋珉, 丁忠义, 等. 城市土地集约利用内涵及其评价指标体系研究 [J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(5): 117-120.
- [3] 陈莹, 刘康, 郑伟元, 等. 城市土地集约利用潜力评价的应用研究 [J]. 中国土地科学, 2002, 16(4): 26-29.
- [4] 曹银贵, 郑新奇, 胡业翠. 区域建设用地集约利用评价研究: 以济南市为例 [J]. 经济地理, 2010, 30(6): 1016-1020.
- [5] 甄江红, 成舜, 郭永昌, 等. 包头市工业用地土地集约利用潜力评价初步研究 [J]. 经济地理, 2004, 24(2): 250-253.
- [6] TD/T 1018-2008, 建设用地节约集约利用评价规程 [S].
- [7] 林坚, 陈祁辉, 晋璟瑶. 土地应该怎么用: 城市土地集约利用的内涵与指标评价 [J]. 中国土地, 2004(11): 4-7.
- [8] 王绍艳, 陈银蓉, 佟香宁. 武汉市城市土地集约利用评价研究初探 [J]. 国土资源科技管理, 2007, 24(1): 12-17.
- [9] 马刚, 李海宇, 徐逸伦. 城市土地潜力分析: 以南京市为例 [J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(3): 56-59.
- [10] 张清军, 曹秀玲, 鲁俊娜. 河北省农村居民点用地集约利用评价 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 321-317.
- [6] 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.
- [7] Lieth H, Box E. The gross primary production pattern of the land vegetation: A first attempt [J]. Tropical Ecology, 1977, 18: 109-115.
- [8] Ito A, Oikawa T. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry matter production theory and plot-scale validation [J]. Ecological Modeling, 2002, 151: 143-176.
- [9] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change-empirical and process-based estimates [J]. Journal of Biogeography, 1995, 22(4/5): 785-796.
- [10] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7: 785-890.
- [11] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem process for regional applications, hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production process [J]. Ecological Modeling, 1988, 42: 125-154.
- [12] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被第一性生产力及季节变化研究 [J]. 地理学报, 2000, 50(1): 36-45.
- [13] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 遥感资料估算中国的净第一性生产力 [J]. 植物学报, 1996, 38(1): 35-39.
- [14] Jiang H, Apps M J, Zhang Y, et al. Modeling the spatial pattern of net primary productivity in Chinese forests [J]. Ecological Modeling, 1999, 122: 275-288.
- [15] Piao Shilong, Fang Jinyun, Guo Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. Acta Phytocological Sinica, 2001, 25(5): 603-608.
- [16] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786-797.
- [17] 国志兴, 王宗明, 张柏, 等. 2000-2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析 [J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [18] Field C B, Randerson J T, Malmstron C M. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51: 74-8.
- [19] Thornthwaite C. W. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 1948, 38: 55-94.

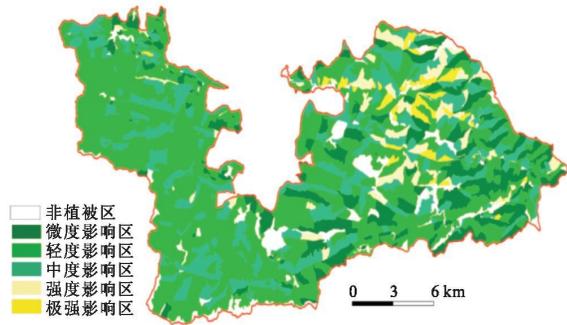
(上接第 100 页)



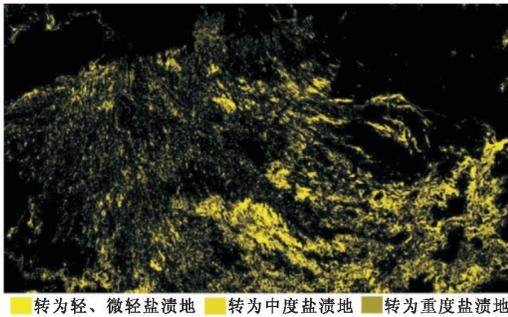
附图6 河南省许昌市不同年份地表温度反演图



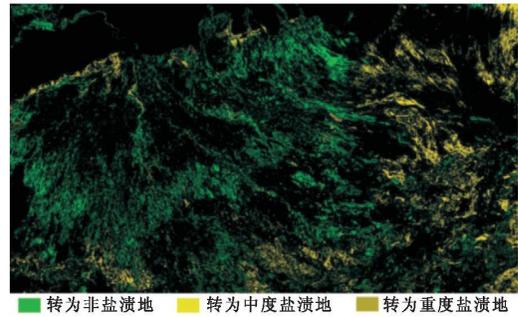
附图7 河南省许昌市不同年份城市热岛区域变化图



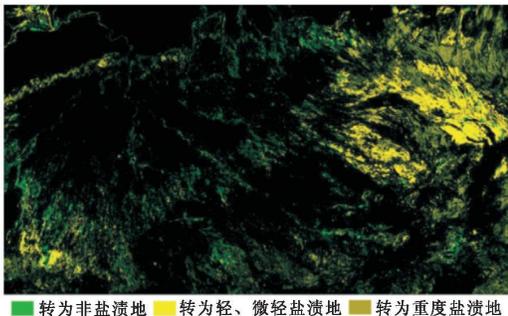
附图8 雪灾对植被NPP影响程度分布图



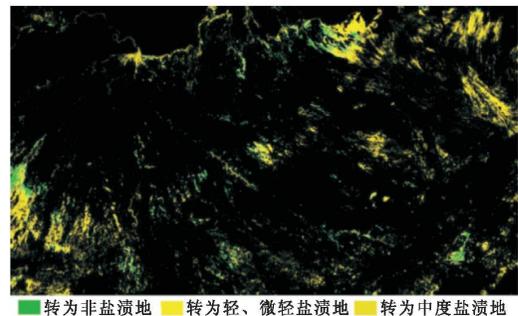
附图10 1989—2001年非盐渍地转化



附图11 1989—2001年轻、微轻盐渍地转化



附图12 1989—2001年中度盐渍地转化



附图13 1989—2001年重度盐渍地转化