

喀斯特断陷盆地土地利用对生态系统生产力的影响

史晨璐 吴秀芹[†]

1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083;
3. 北京林业大学云南建水荒漠生态系统国家定位研究站, 建水 654399; [†] 通信作者, E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn

摘要 为了客观地评估断陷盆地土地利用对生态环境的影响, 从生态系统服务变化反映更深层次的人地之间复杂关系, 本文基于断陷盆地多时间序列土地利用数据和陆地植被净生产力(NPP), 阐明断陷盆地 NPP 时空变化趋势, 揭示多年间土地利用变化的地类层次变化特征; 运用生命周期评估方法, 定量地分析土地占用和土地转化对石漠化地区陆地植被净生产力的影响, 探讨石漠化治理的生态效益。结果表明: 1) 2000—2015 年间, 断陷盆地大部分区域 NPP 变化不显著, 少部分区域变化显著, 以上升趋势为主; 2) 在 6 种地类中, 林地变化平稳, 建设用地增加趋势活跃且强烈, 草地减少趋势活跃且强烈; 3) 林地占用潜在植被生产力与现有 NPP 之间的差值由西向东逐渐增加, 与林地占用面积减少的空间分布一致, 林地分布影响林地植被净生产力水平; 4) 研究区北部植被自然生长情况较好, 东部地区六盘水市、普安县和陆良县石漠化区域林地植被存在一定程度的天然退化, 林地生态恢复工程效果不明显; 5) 研究区 80% 的土地转化类型使得 NPP 增益, 其中使 NPP 明显提升、有效而普遍的方式是草林转换和退耕还林; 林地转为建设用地则对 NPP 的损害最大。

关键词 净初级生产力(NPP); 土地利用强度; 断陷盆地; 喀斯特; 生命周期环境影响评估

Impact of Land Use on Ecosystem Productivity in Karst Faulted Basin

SHI Chenlu, WU Xiuqin[†]

1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3. Yunnan Jianshui Desert Ecosystem National Positioning Research Station, Jianshui 654399; [†] Corresponding author, E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn

Abstract In order to objectively evaluate the impact of land use on the ecological environment in faulted basins, and reflect the complex relationship between people and land at a deeper level from changes in ecosystem services, based on multi-time series land use data and terrestrial vegetation net productivity (NPP) in faulted basins, the temporal and spatial variation characteristics of NPP in faulted basins are clarified, and the characteristics of land-level changes in land use change intensity over many years is revealed. The life cycle assessment method is used to quantitatively analyze the impact of land occupation and land conversion on the net productivity of terrestrial vegetation in rocky desertification areas, and explores the ecological benefits of rocky desertification control. The results show that 1) the change of net primary productivity (NPP) in most areas of the study area was not significant between 2000 and 2015, NPP showed significant changes in a small part of the region with an upward trend as the main trend; 2) among the six land types, the change of forest land is stable, the growth trend of construction land is active and strong, and the grassland reduction trend is active and strong; 3) the difference between the potential vegetation productivity of forest land and the existing NPP gradually increases from west to east, and has a consistent spatial distribution with the reduction of forest land occupation, indicating that forest land distribution will affect the net productivity of forest land vegetation; and 4) the natural vegetation growth in the northern part of the study area is good. The forest vegetation in the rocky desertification areas of Liupanshui City, Pu'an County and Luliang County in the eastern region has a certain degree of natural degradation, and the

ecological restoration effect of forest land is general; 5) 80% of land conversion types in the research area makes NPP gain. The common way to makes NPP significantly improved is to convert grassland and cultivated land into forest land; the conversion of forest land to construction land causes the most damage to NPP.

Key words net primary productivity (NPP); land use intensity; faulted basin; karst; life cycle environmental impact assessment

人类占用土地和改造土地的活动会改变生态系统的生产力, 评估土地利用对生态系统生产力的影响能够量化生态系统在人为干扰情况下的潜在自然资源生产力变化情况。土地利用会改变陆地生态系统的结构和功能^[1-2], 某种土地利用类型使用面积增加意味着其他土地利用类型的使用面积减少。由于土地资源有限, 人类在改造土地的过程中往往会根据经济效益来决定土地利用类型, 获得利益最大化。但是, 土地利用类型的改变也会对陆地生态系统产生影响^[3], 人类的干预将直接影响自然提供生态系统服务的能力^[4], 仅考虑经济效益无法衡量土地利用对人类福祉的作用, 还要考虑在土地管理过程中产生的生态效益。为此, 评估土地利用对生态系统的影响可以量化土地管理中的生态效益, 有助于优化土地利用方式, 协调经济发展和生态环境治理的关系。

生命周期评估(life cycle assessment, LCA)方法广泛用于评价某一产品在生产过程(或服务过程)的生命周期内对环境的影响。欧美国家起步较早, 对该评估理论和方法均有广泛和深入的探讨^[5]。国内研究开展较晚, 与发达国家存在一定的差距。生命周期评估方法可定量地评估土地利用变化产生的环境影响, 量化土地管理过程中的生态效益^[6-7]。国内外学者在评估土地利用对生态系统的影响时, 大多通过生态系统失去的物种数量作为指标来估计生态系统的损害程度^[8-9]。但是, 人类并未直接从生态系统丰富的物种中获得经济利益, 物种丰富度只能表征良好的生态系统质量, 不能直接代表生态系统的服务功能^[10]。在以上研究的基础上, 欧洲学者提出净初级生产力(net primary productivity, NPP)指标, 可直接地呈现生态系统服务的潜在损失^[11]。Itsubo等^[12]针对土地占用和土地转移, 分别建立土地利用NPP损害函数。一些国外学者利用该函数评估区域土地利用对生态系统生产力造成的损害, 揭示不同类型的土地占用和土地转移对生态系统生产力影响的规律, 取得一些成果^[10-13]。国内尚未将此方法运用到土地利用对生态系统影响的评估中,

并且, 在分析土地利用时, 很少将占用和转移分开来探讨^[14-17]。

石漠化是一种以人类活动为驱动力的土地退化类型。喀斯特断陷盆地长期面临石漠化问题, 该区域的土地利用冲突严重^[18-19], 使得本来就匮乏的土地资源更加难以满足当地生产、生活和生态保护方面的需求, 原本就脆弱的生态环境中人地矛盾更加突出^[20], 加上生态恢复项目的实施, 使得区域生态环境的人为扰动情况复杂化。人为干扰反映在空间上就是土地利用的变化, 这些变化势必影响生态系统的供给能力。因此, 亟需分析植被净生产力的时空变化规律, 评估土地利用对生态系统生产力的影响程度, 揭示土地利用与NPP时空变化之间的联系。本文基于生命周期评估理论中的土地利用NPP损害函数, 研究喀斯特断陷盆地土地利用对生态系统生产力的影响, 了解生态治理过程中土地变化对生态系统服务功能的影响程度, 为该地区未来开展合理有效的土地管理、优化石漠化生态治理机制以及缓解人地矛盾提供理论依据。

1 研究区概况

断陷盆地位于云贵高原, 介于100°3′—105°10′E和22°39′—29°10′N之间, 包括滇东至四川攀西(昌)盐源地区及贵州西部的43个县(图1), 总面积达11.03万km², 石漠化面积为1.51万km²。其中, 滇东地区岩溶发育典型, 石漠化严重。研究区主要包含3种地貌类型——盆地、山地和坡地, 最高海拔为5273 m, 最低海拔为132 m, 总体地势呈西北高, 东南低。年均降雨量为900~1200 mm, 年均气温为13.5~15.5°C, 夏季多暴雨, 降水季节分配不均。盆地与周边山区的气候反差大, 与山区相比, 盆地降水量低1/3, 而蒸发量高1/3, 年均气温高4~5°C, 盆地缺水更为严重; 盆地周边山地林草植被破坏严重, 石漠化现象突出, 未利用地占比较高, 生态环境脆弱, 属山洪、泥石流多发区; 盆地内地下水文过程活跃, 水资源短缺, 制约了土地和光热资源的开发利用^[21]。

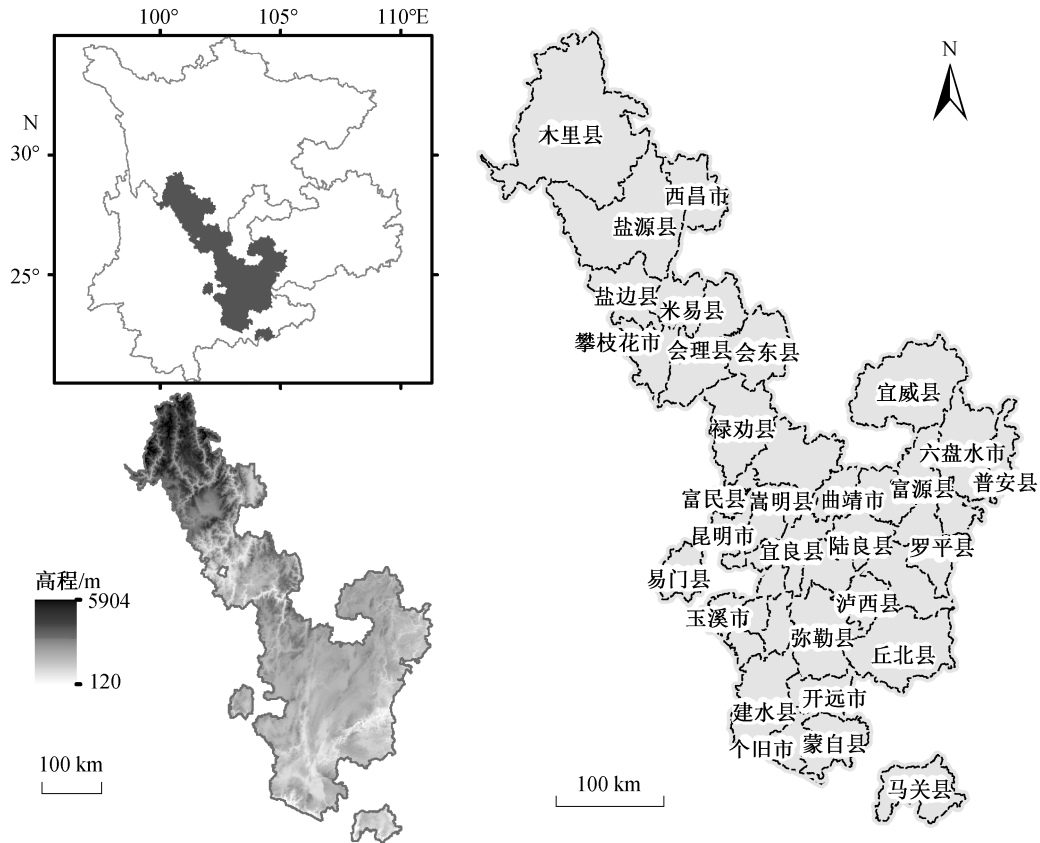


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据来源与处理

本研究采用的 NPP 数据来自 2000—2015 年 MOD17A3 全球 NPP 数据产品 (<http://www.ntsg.umn.edu/>), 共 32 景, 空间分辨率为 1 km。气象数据来自中国气象科学数据共享网 (<http://data.cma.cn/data/cdcindex.html>), 选取 2001—2015 年研究区附近 43 个气象站点的平均气温(°C)和最高气温(°C)等资料, 通过克里金插值(Kriging)处理得到 250 m 分辨率的栅格数据。

土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 30 m 分辨率的 2000, 2005, 2010 和 2015 年 4 期土地利用矢量数据, 通过拼接和裁剪等预处理, 生成 250 m 分辨率的栅格数据。NDVI 数据采用 NASA (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 发布的 MODIS 植被指数 MOD13Q1 250 m 产品。植树造林面积数据来自《中国县域统计年鉴》和《中国林业统计年鉴》。高程数据来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的 ASTER_GDEM30 m 数字高程产品。喀斯特石漠化

治理措施数据来自中南林业调查规划设计院第二次石漠化监测成果(<http://www.forestry.gov.cn>)。

3 研究方法

3.1 利用 CASA 模型计算 NPP

为了获得分辨率较高的 NPP 数据, 本文采用应用广泛的中国陆地植被净生产力改进模型^[22]获取研究区 250 m 分辨率的 NPP, 估算方法如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t), \quad (1)$$

式中, x 代表栅格数据中具体像元; t 代表时间; $NPP(x, t)$ 是 x 像元上的植被 t 月份净初级生产力, 由植被所吸收的光合有效辐射(APAR)与光能转化率 $\varepsilon(x, t)$ 的乘积决定。式(1)中使用的参数是朱文泉等^[23-24]将 CASA 模型改进后, 对 NPP 模型进行校正后的参数, 适用于中国陆地的情况。

3.2 利用 Thornthwaite 纪念模型计算潜在植被生产力

潜在植被生产力表示只由气候引起, 没有人类活动的自然状态下植被净初级生产力; 当其他因素处于最适宜的自然状态下, 气候因素决定单位面积

上土地可能获得的生物学产量^[25]。研究区内降水和温度差异较大,气候条件对植物生产力有重要的影响,气温的升高促进植被生长,但如同时降水不足,则可能导致植被覆盖退化^[26]。本文用降水量和温度表达气候环境,使用 Lieth 等^[27]在 1972 年提出的 Thornthwaite 纪念模型估算潜在植被生产力,能够有效地说明气候变化对自然植被生产力的影响:

$$NPP(E) = 3000 \left[1 - e^{-0.0009695(E-20)} \right], \quad (2)$$

式中, $NPP(E)$ 是每年实际蒸发量计算得到的植物净初级生产力($g/(m^2 \cdot a)$),也就是没有人类活动自然状态下的潜在植被生产力; E 是年平均实际蒸发量(mm),计算公式为

$$E = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1 + 1.05R/L)^2}}, \quad (3)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2. \quad (4)$$

式中, R 是年平均降水量(mm); L 为年平均蒸散量(mm),是平均温度的函数; T 表示年平均气温($^{\circ}C$)。

3.3 NPP 空间趋势分析

采用 Theil-Sen Median (TS) 趋势分析和 Contextual Mann-Kendall test (CMK) 显著性检验,对 2001—2015 年断陷盆地 NPP 的空间演变特征进行分析。该方法是判断长时间序列数据变化趋势的重要方法,已逐步运用到植被长时间序列分析中^[28-31]。TS 趋势分析可以减弱异常值的影响,对于显著性水平的检验具有较坚实的统计学理论基础,计算公式为

$$\beta = \text{mean} \left(\frac{NPP_j - NPP_i}{j - i} \right), \quad (5)$$

式中, NPP_j 和 NPP_i 为栅格数据集($2000 \leq i \leq j \leq 2015$), β 为植被变化趋势。本文取置信水平 $\alpha=0.001$,判断在 0.001 置信水平上 NPP 时间序列变化趋势的显著性。

3.4 土地利用变化强度

采用土地利用的强度分析理论对土地利用变化强度分析自上而下层级的解释性分析描述^[32],对研究区 2000—2005 年、2005—2010 年和 2010—2015 年的土地利用变化进行分析,主要探讨第二个层次——地类层次变化特征。孙云华等^[32]将地类变化稳定性定义为地类变化强度大于(或小于)所有间隔的平均变化强度;针对每一个间隔,将某种地类变

化强度大于该时间间隔的平均变化强度称为变化活跃,反之则是变化平稳。计算公式如下:

$$G_{ij} = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tij} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^J C_{tij}} \times 100\%, \quad (6)$$

$$L_{ii} = \frac{\left[\left(\sum_{j=1}^J C_{tij} \right) - C_{ii} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\%。 \quad (7)$$

式中, G_{ij} 为 t 时间间隔内土地覆盖类型 j 增加变化的强度, L_{ii} 为 t 时间间隔内土地覆盖类型 i 减少变化的强度, J 为土地覆盖类型总数, C_{tij} 为在 t 时间间隔内土地覆盖类型 i 变为土地覆盖类型 j 的面积, Y_t 为年份。

3.5 土地利用对 NPP 的影响

土地利用分为土地占用和土地转化,土地占用指同一种用地类型连续使用土地,土地转化指土地改造和土地类型变更。本研究采用 Itsubo 等^[12]的土地占用和土地转化 NPP 变化函数,计算土地占用和土地转化造成的 NPP 变化,衡量土地利用对生态系统生产力造成的影响,计算方法如下:

$$DF_{NPP}^{Occ}(a) = NPP_p - NPP_a, \quad (8)$$

$$DF_{NPP}^{Trans}(b, a) = 0.5 \times (NPP_p - NPP_a) \times T_{a \rightarrow p} - 0.5 \times (NPP_p - NPP_b) \times T_{b \rightarrow p}。 \quad (9)$$

式中, $DF_{NPP}^{Occ}(a)$ 表示土地利用类型 a 在某个阶段占用土地时对 NPP 的影响程度,其绝对值越小,意味着时间间隔内土地占用对 NPP 的影响程度越小,当其值为负时,说明土地占用对 NPP 有正向的影响; NPP_a 表示当土地类型为 a 时的植被生产力, NPP_p 表示自然状态下的潜在植被生产力; $DF_{NPP}^{Trans}(b, a)$ 表示在某个阶段土地利用类型从 b 变到 a 时对 NPP 的影响程度, NPP_b 表示当土地类型为 b 时的生态系统生产力, $T_{a \rightarrow p}$ 表示土地利用类型 a 恢复到自然状态所需要的时间, $T_{b \rightarrow p}$ 表示土地利用类型 b 恢复到自然状态所需要的时间。

该函数设定的自然状态在 LIME (lifecycle impact assessment method based on endpoint modeling) 中定义为森林,恢复时间定义为土地达到自然状态下所用的时间。研究区各种土地利用类型恢复时间来自

云南省、四川省和贵州省的统计年鉴，经过多年平均得到，见表 1。

4 结果与分析

4.1 断陷盆地 NPP 的时空变化

TS 趋势分析以及 CMK 检验可以有效地反映 2000—2015 年喀斯特断陷盆地 NPP 变化趋势的空间分布特征。利用 TS 趋势分析，结合 CMK 检验，将结果划分为极显著上升($P<0.001, \beta>0$)、极显著下降($P<0.001, \beta<0$)、显著上升($P<0.01, \beta>0$)、显著下降($P<0.01, \beta<0$)和不显著变化。由图 2 可以看出，2000—2015 年，研究区 NPP 值在 88.85%的区域变

化不显著；NPP 呈极显著变化($P<0.001$)的区域占 4.23%，其中极显著上升区域面积是极显著下降区域的 3 倍；NPP 值呈现显著变化($P<0.05$)的区域占 6.93%，显著上升的区域面积占比接近显著下降区域的两倍。

结合土地利用数据可知，林地、草地和耕地对 NPP 的贡献占 85%~99%(图 3)，其中林地对 NPP 的贡献超过 50%。盐源县和宣威县 NPP 的上升趋势最为显著。宣威县位于云贵高原中部，是退耕还林和还草工程主要实施区域，林业统计植树造林面积远大于其他地区^[33]；盐源县位于青藏高原东南边缘，雅砻江下游沿岸，植树造林面积大于附近县市，植被覆盖增加^[34]。昆明市和玉溪市的 NPP 下降趋势明显，是城市快速发展，耕地和草地转化为建设用地所致。

4.2 土地利用变化强度分析

从不同时间间隔平均变化强度(图 4)来看，3 个时间间隔土地利用平均变化强度呈上升趋势，其中，2000—2005 年土地利用变化强度值为 2.17，是整个研究时段内变化最为缓慢的时期。

表 1 各类用地植物生长情况^[3,12]

Table 1 Growth of various types of land use plants^[3,12]

土地利用类型	种植植物需要时间/年	平均种植时间/年	恢复时间/年
耕地	0.5~3	1.8	28
未利用地	0	0	30
草地	0.1~0.5	0.3	30
林地	15~45	30	0
建设用地	0	0	90
水域	0	0	30

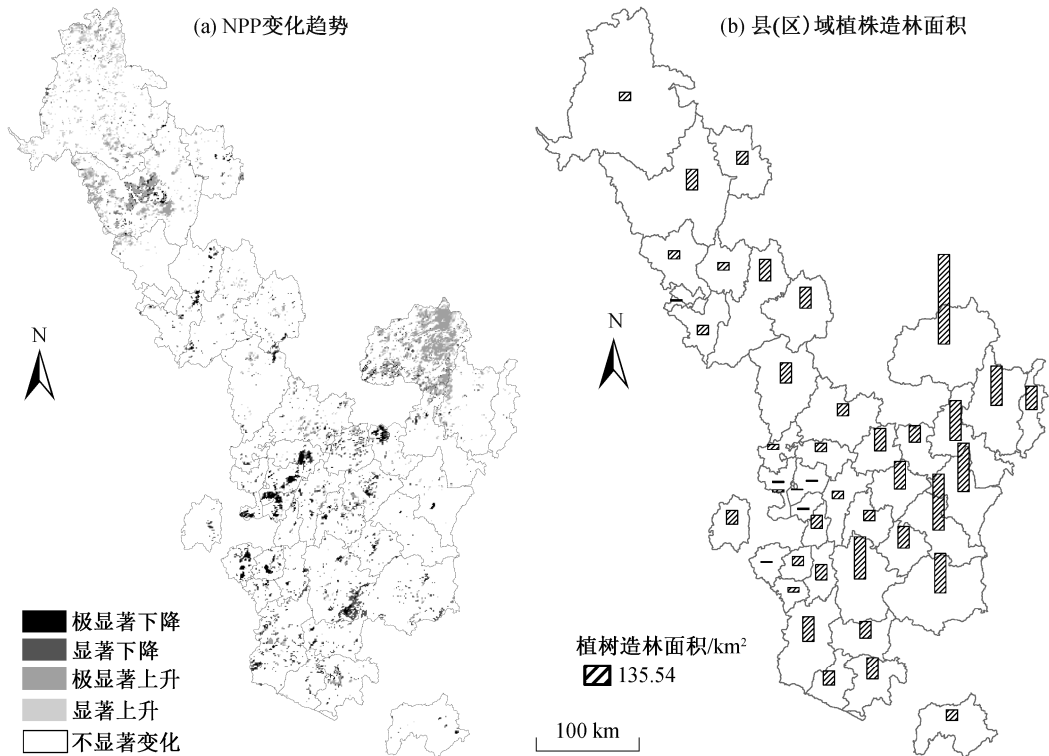


图 2 2000—2015 年 NPP 空间变化趋势
Fig. 2 Trends in NPP space change from 2000 to 2015

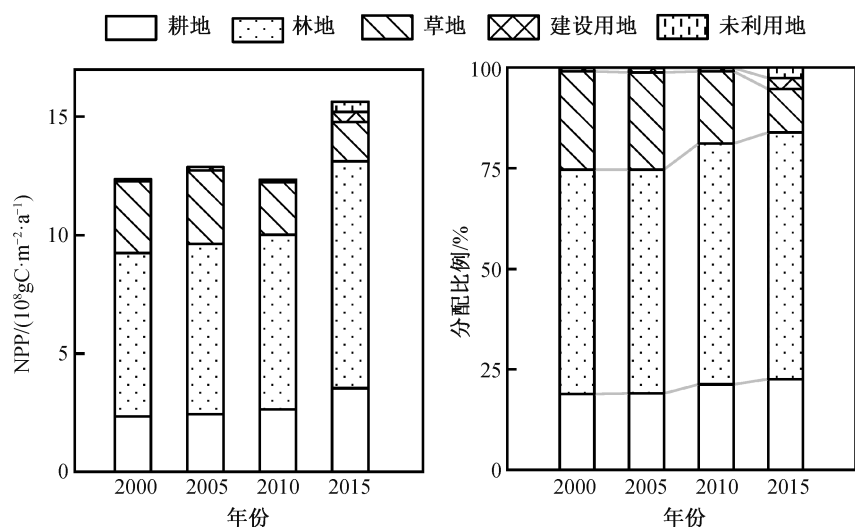


图 3 NPP 总量分配情况
Fig. 3 Distribution of total NPP

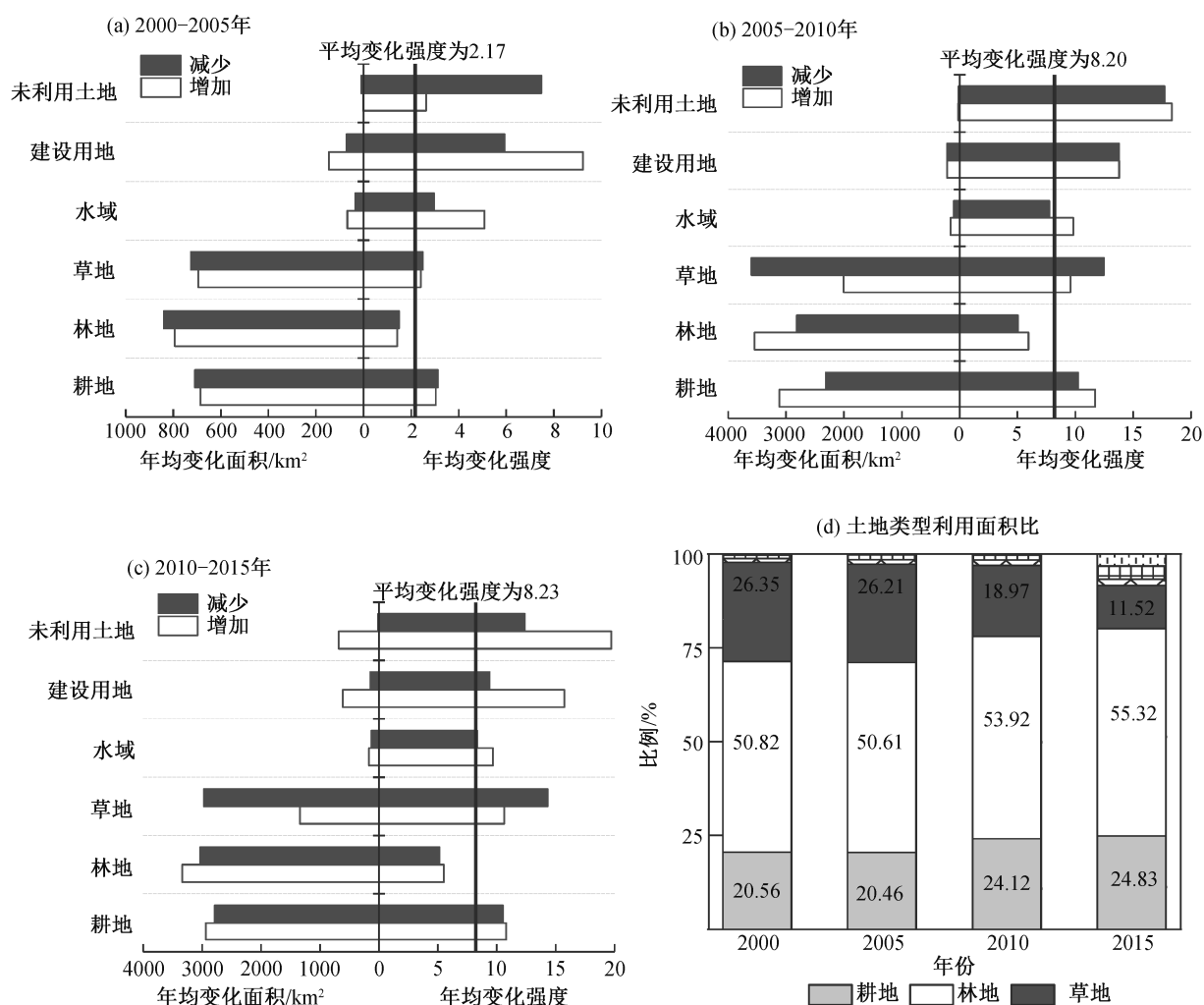


图 4 土地利用面积及强度变化
Fig. 4 Change of land use area and intensity

在所有的地类中,林地面积年均变化是最大的,但变化强度始终低于平均值,整个时段中的变化强度稳定,这跟林地面积基数大有关(林地面积在2000—2015年间占研究区面积的50%以上);未利用地、建设用地、草地和耕地变化强度始终高于平均值,整体变化强度稳定,在每个时间间隔增减变化活跃。建设用地在2000—2005年和2010—2015年的增加变化强度远大于减少变化强度,其增加趋势活跃且强烈;草地的减少趋势活跃且强烈,减少变化的强度始终高于增加的变化强度,且愈演愈烈。

4.3 土地利用对生态系统生产力的影响

4.3.1 土地占用对生态系统生产力的影响

2000—2015年,土地占用面积达到38.57%,其中林地是主要的土地占用类型,面积占土地占用区域的75.94%(图5),林地占用下潜在植被生产力与NPP之间的差值(DF_{Occ})自西向东呈增加的趋势。

研究区北部木里县西区 DF_{Occ} 值较小,境内分布水源涵养林,实施封山管护等天然林保护措施(图6),植被自然生长情况较好,植被净生产力接近气候条件下的预测值。东部地区六盘水市、普安县和陆良县林地的植被净生产力与潜在植被生产力相差甚远,该地区石漠化面积大,林地植被存在一定程度的天然退化,2001年以来喀斯特地区实施生态恢复项目^[33]收效甚微,林地恢复生态工程生态效果不显著。林地分布面积减少趋势与林地占用下的潜在植被生产力与NPP的差值增加趋势相同,林地面积占比较高会对植被生产力产生有利影响,而林地的减少会导致区域植被净生产力产生一定程度的下降。

草地是生态项目实施影响较大的地类,草地植被生产力与NPP之间的差值分布趋势与林地大致相同。从土地占用情况来看,草地多与林地穿插分

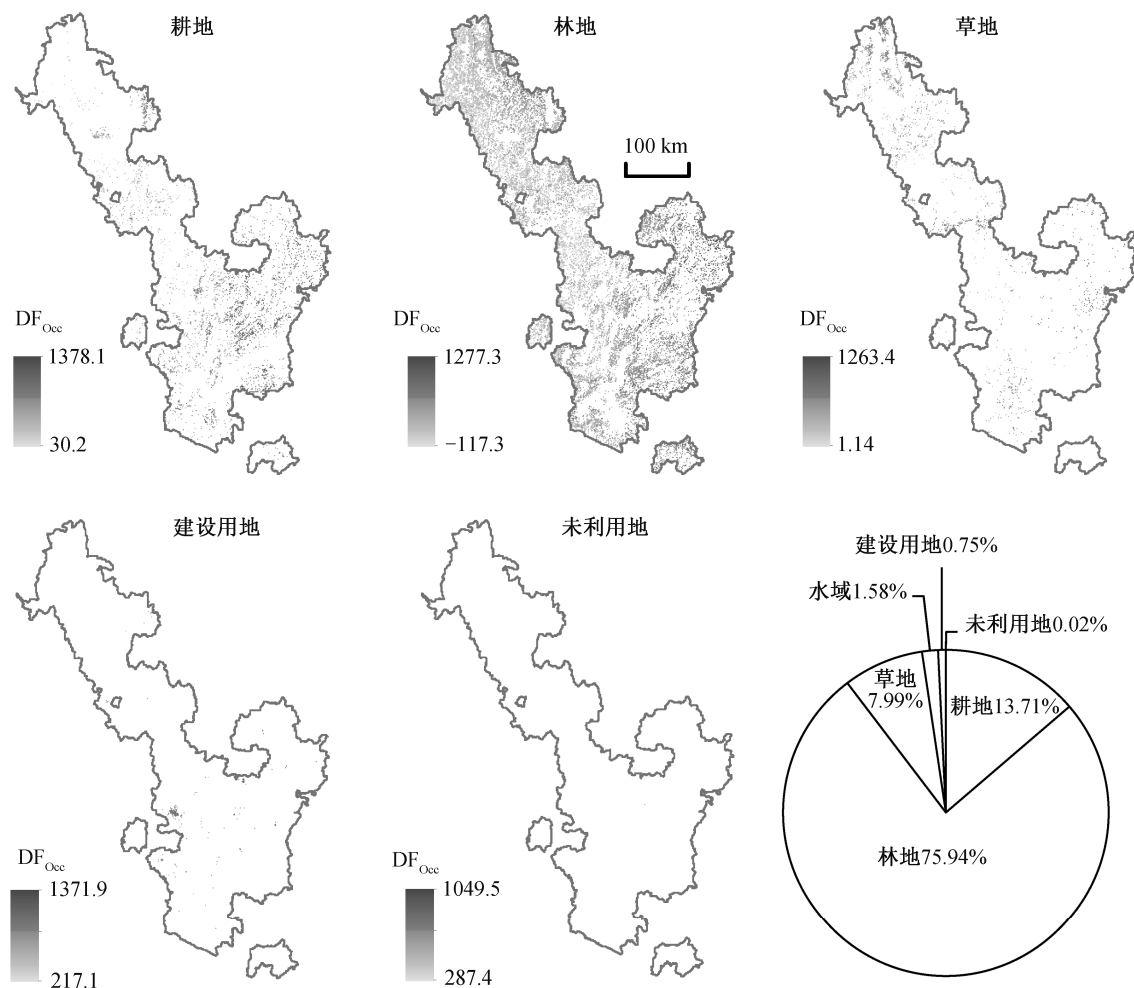


图5 DF_{Occ} 空间分布、土地占用类型分布

Fig. 5 DF_{Occ} spatial distribution, land occupation type distribution

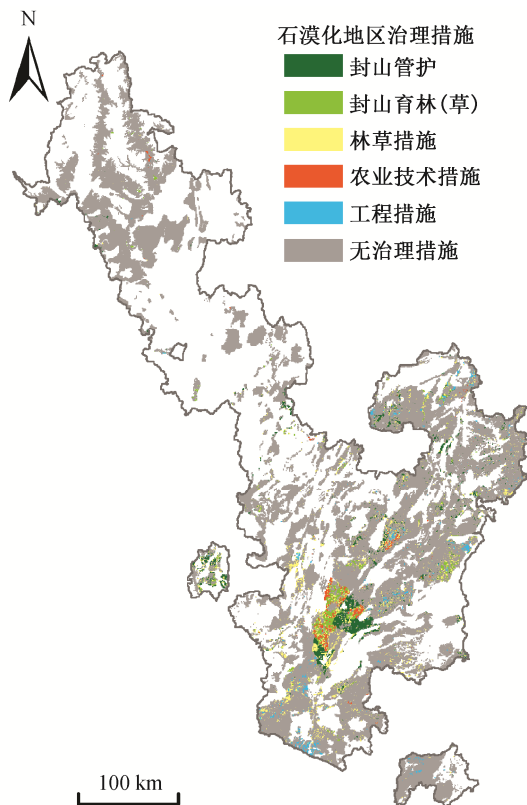


图 6 喀斯特石漠化治理措施
Fig. 6 Karst rock desertification control measures

布。研究区北部木里县草地 NPP 与潜在植被生产力相差最小, 此处虽有石漠化区域, 但对植被正常发育影响较小, 封山育林(草)治理措施已见成效^[33]。富源县、罗平县东部地区石漠化区域草地生长情况较差, 实施封山育草等治理措施效果不理想。

耕地潜在植被生产力与 NPP 之间的差值自中部向东南呈增加趋势, 最小值分布在木里县南部、盐边县北部区域和会理县东北部区域, 该区域位于高山峡谷, 水量充沛, 适宜农业发展。

相对其他 3 种类型而言, 研究区内建设用地和未利用地所占面积均小于 1%, 土地占用特征不明显。

从不同土地占用在不同时间段内潜在植被生产力与 NPP 之间的差值(DF_{Occ})(图 7)来看, 林地和草地占用下气候情景潜在植被生产力与 NPP 之间的差值呈下降趋势, 建设用地和未利用地占用下呈增加趋势; 耕地占用下的差值则是先增加后减少。从整体来看, 林地和草地短期占用(2000—2010 年)对植被生产力没有产生太大的影响, 但是 2010—2015 年林草占用下气候情景潜在植被生产力与 NPP 之

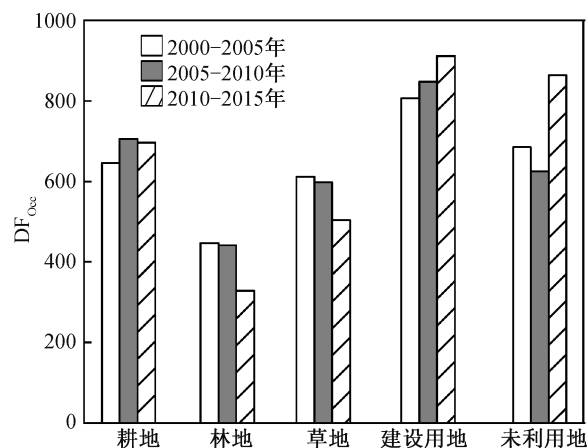


图 7 3 个时间间隔 DF_{Occ}
Fig. 7 Three Time Intervals DF_{Occ}

间的差值明显变小, 揭示人类活动和生态工程的实施对断陷盆地植被的恢复有促进作用^[35]。

DF_{Trans} 表示土地转化对 NPP 产生的正向或者负向影响, 其值小于 0 表明土地转化使 NPP 增益(正向影响), 反之则使 NPP 损失(负向影响)。土地转化多发生在研究区中部、南部和东部地区(图 8), 这些地区的人口分布相对密集, 对土地利用的需求高于其他地区。2000—2015 年各类土地之间转化对 NPP 造成的影响不存在明显的地域差异。

4.3.2 土地转化对生态系统生产力的影响

土地转化使 NPP 增益($DF_{Trans} < 0$)区域占整个研究区面积的 63.31%, 大多数地区的 DF_{Trans} 值分布在 0 与区域平均值之间, 其中草地转林地、耕地转林地和草地转耕地类型面积占比达到 83.57%。如图 9 所示, 建设用地转为其他 5 种地类使 NPP 明显增益, 这种转化是存在的, 但面积占比极小; 其他 5 种地类转变为林地同样使 NPP 明显上升, 其中比较有效和常见的方式是将草地和耕地转为林地, 这也是喀斯特生态环境恢复工程实现林地增长的方式。研究区有 36.96% 的区域土地转化使 NPP 损失($DF_{Trans} > 0$), 其中林地转草地和林地转耕地类型面积占比达到 70.12%, 是主要的土地转化类型。其他用地类型转为建设用地对 NPP 的损害程度明显大于其他转化类型, 其中林地转建设用地使 NPP 损失最大, 对生态系统服务能力的破坏程度最强。在 30 种转化类型中, 有 15 种转化类型在不同区域对 NPP 的影响不同, 说明同一种转化类型在不同的地理条件下会产生相反的影响。在 15 种类型中, 有 12 种 (80%) 类型在研究区内使 NPP 增益, 只有 3 种类型

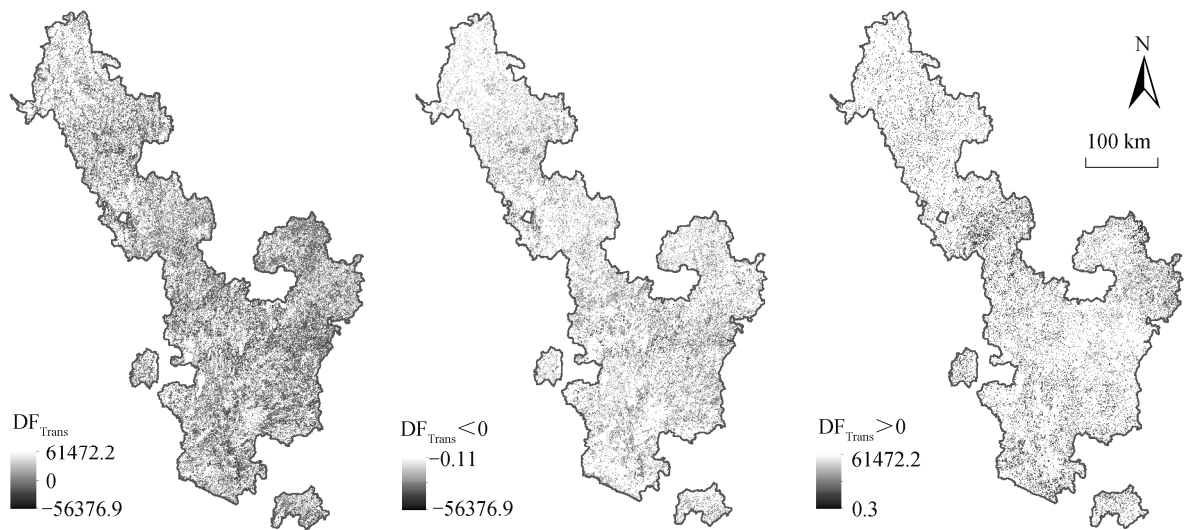
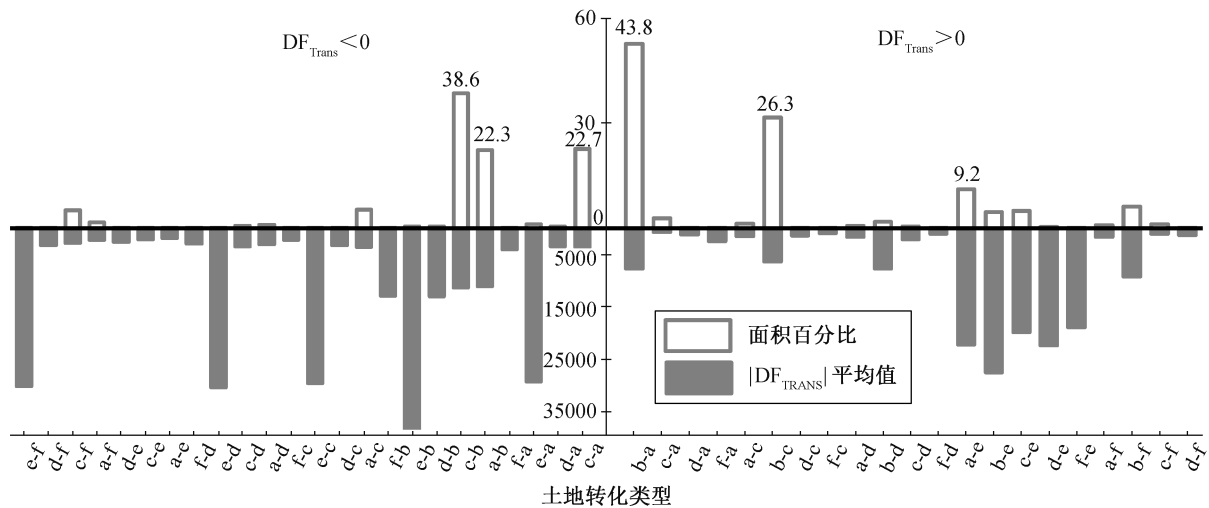


图 8 DF_{Trans} 空间分布
Fig. 8 DF_{Trans} spatial distribution



a 代表耕地, b 代表林地(包括灌木), c 代表草地, d 代表水域, e 代表建设用地, f 代表未利用地; x-y 表示类型 x 转为类型 y

图 9 各类土地转移所占面积比例及其 DF_{Trans} 平均值
Fig. 9 Area ratio of land transfer and its DF_{Trans} average

使 NPP 损失。也就是说, 对 NPP 同时具有增益和损失功能的土地转化类型在整体上以增益功能为主, 同时 NPP 增益在研究区南部和东南部地区密集分布, 此处也是石漠化治理措施密集分布的区域, 断陷盆地生态修复初见成效。

5 结论与讨论

本文利用 MOD17A3 NPP 数据, 结合 TS 趋势分析和 CMK 显著性检验, 对 2000—2015 年 NPP 进行趋势分析, 基于土地利用变化强度理论, 探讨研究区 2000, 2005, 2010 和 2015 年土地利用变化, 借

助生态土地占用和土地转化 NPP 变化函数, 将土地利用和 NPP 变化相结合, 量化研究区土地利用变化对生态系统生产力(NPP)影响, 得到以下结论。

1) 研究区范围内大部分地区 NPP 变化不显著, NPP 变化显著的地区以 NPP 呈上升趋势为主。

2) 2005—2010 年土地利用变化强度值最大, 是整个研究时段内变化最快的时期。林地的变化强度始终低于平均变化强度, 林地变化强度稳定; 未利用地、建设用地、草地和耕地的变化强度始终高于平均值, 整体变化强度稳定, 在每个时间间隔的增减变化活跃。建设用地增加的趋势始终活跃且强

烈, 草地减少趋势始终活跃且强烈。

3) 研究区林地占用下潜在植被生产力与NPP之间的差值呈现由西向东增加的趋势, 这种趋势与林地占用的减少有相同的空间分布。研究区北部植被自然生长情况较好, 东部地区六盘水市、普安县和陆良县石漠化区域的林地植被存在一定程度的天然退化, 林地生态恢复工程效果一般。虽然研究区北部草地占用处于石漠化分布区, 但对植被正常发育影响较小, 生态恢复工程初见成效。富源县及罗平县东部地区石漠化区域草地生长情况较差, 实施封山育草治理措施效果不理想。

4) 土地转化对NPP的影响不存在明显的空间异质性, 研究区土地转化区域约2/3的面积使NPP增益, 其中草地和耕地转为林地可以使NPP明显提升, 这两种转化方式在研究区内比较有效且常见。另有36.96%的转化区域使得NPP损失, 林地改造成建设用地使NPP损失最大。同一种转化类型在不同地理区域中对NPP的影响不同, 但以增益为主。NPP增益在研究区南部和东南部地区密集分布, 此处也是石漠化治理措施密集分布区, 生态恢复项目已见成效。

本研究结果能够为研究区后续土地利用规划和生态环境恢复提供一些科学依据。同时, 本研究存在一些局限性: 生态系统生产力是自然环境为人类生产生活服务的供给能力, 本文没有将生态系统生产力与当地土地产出、经济发展和社会生产相结合; 在选择改造土地类型时, 不仅应考虑生态环境, 还要考虑社会经济情况, 本文对于土地改造情况, 仅从生态环境的角度提出改造意见; 栅格数据分辨率为250 m, 与实际土地利用情况存在误差, 尤其是建设用地和未利用地的精确度有待提高。

参考文献

- [1] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277: 494–499
- [2] Lin D, Yu H, Lian F, et al. Quantifying the hazardous impacts of human-induced land degradation on terrestrial ecosystems: a case study of karst areas of south China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(15): 1127
- [3] Kaenchan P, Jeroen Guinée, Gheewala S H. Assessment of ecosystem productivity damage due to land use. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1320–1329
- [4] Pavan A L R, Ometto A R. Regionalization of land use impact models for life cycle assessment: recommendations for their use on the global scale and their applicability to Brazil. *Environmental Impact Assessment Review*, 2016, 60: 148–155
- [5] 肖汉雄, 杨丹辉. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用. *城市与环境研究*, 2018(1): 88–105
- [6] Rosa D, Michele. Land use and land-use changes in life cycle assessment: green modelling or black boxing?. *Ecological Economics*, 2018, 144: 73–81
- [7] Taelman S E, Schaubroeck T, Meester S D, et al. Accounting for land use in life cycle assessment: the value of NPP as a proxy indicator to assess land use impacts on ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 143–156
- [8] Baan L D, Alkemade R, Koellner T. Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(6): 1216–1230
- [9] Gabel V M, Meier M S, Köpke U, et al. The challenges of including impacts on biodiversity in agricultural life cycle assessments. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 249–260
- [10] Callesen I. Biodiversity and ecosystem services in life cycle impact assessment — inventory objects or impact categories. *Ecosystem Services*, 2016, 22A: 94–103
- [11] European Commission. International reference life cycle data system (ILCD) handbook — framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010
- [12] Itsubo N, Inaba A. LIME2: life cycle impact assessment method based on endpoint modeling chapter 2: characterization and damage evaluation models. Tokyo: Life Cycle Assessment Society of Japan, 2014
- [13] Lawler J J, Lewis D J, Nelson E, et al. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. *PNAS*, 2014, 111(20): 7492–7497
- [14] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726–736
- [15] 刘伟, 刘祥宏, 但新球, 等. 生态脆弱区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以贵州北盘江

- 大峡谷国家湿地公园为例. 草地学报, 2015, 23(4): 689-696
- [16] 魏慧, 赵文武, 张骁, 等. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价——以山东省德州市为例. 生态学报, 2017, 37(11): 3830-3839
- [17] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响——以河南省商丘市为例. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1597-1606
- [18] 李阳兵, 白晓永, 周国富, 等. 中国典型石漠化地区土地利用与石漠化的关系. 地理学报, 2006, 61(6): 624-632
- [19] 许联芳. 西南喀斯特区域土地利用与石漠化相关性分析——以环江毛南族自治县为例. 国土与自然资源研究, 2009(1): 18-20
- [20] 胡勇. 西南石漠化山区农村土地利用冲突的调控机理研究——以贵州麻山地区为例. 广东农业科学, 2011, 38(7): 223-224
- [21] 吴协保, 孙继霖, 林琼, 等. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨. 中国岩溶, 2009, 28(4): 391-396
- [22] 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 等. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. 科学通报, 2007, 52(21): 2535-2541
- [23] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706
- [24] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424
- [25] 宋连春. 干旱地区气象研究. 北京: 气象出版社, 2003
- [26] 徐兴奎, 陈红, Levy J K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析. 科学通报, 2008, 53(4): 456-462
- [27] Leith H, Box E. Evapotranspiration and primary productivity. New Jersey: Climatology, 1972
- [28] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 235-260
- [29] Lunetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, et al. Land-cover change detection using multi-temporal. Remote Sensing of Environment, 2009, 105(2): 142-154
- [30] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价. 遥感学报, 2009, 13(6): 1170-1186
- [31] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806
- [32] 孙云华, 郭涛, 崔希民. 昆明市土地利用变化的强度分析与稳定性研究. 地理科学进展, 2016, 35(2): 245-254
- [33] Tong X, Wang K, Yue Y, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 54: 105-113
- [34] 管磊, 王华军, 王玉宽. 基于 GIMMS NDVI 数据的四川植被覆盖度时空变化特征. 科技通报, 2016, 32(6): 31-36
- [35] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 等. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性. 生态学报, 2017, 37(12): 4008-4018