

基于 MODIS-EVI 的 2000~2015 年重庆植被覆盖季节变化^{*1}

朱林富^{1, 2} 谢世友^{1, 2*} 杨华³ 马明国^{1, 2}

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

2. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

3. 重庆师范大学 GIS 应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331)

【摘要】: 基于 2000~2015 年的 MODIS-EVI 数据, 采用 MVC、趋势分析和分布指数法, 分析了重庆近 16a 来植被的季节变化趋势和空间分布特征。结果表明: (1) 植被减少类型冬季比例最高(6.33%), 主要分布于受库区蓄水和建设用地扩张影响的河谷、城镇及其周边地区; 植被不变类型秋季比例最高(88.23%); 植被增加类型春季比例最高(31.50%), 主要分布于农业种植的西部丘陵区和中部平行岭谷地区。(2) 植被变化类型优势分布区域各异, 植被减少主要分布于小于 400m、小于 6° 区域, 植被增加主要分布于 400~1000m、6°~15° 区域, 在大于 1000m、大于 15° 区域植被相对稳定。(3) 从春季到夏季, 植被减少类型向低地形区(<800m, <6°) 移动, 而植被增加类型则向高地形区(>800m, >6°) 移动; 从夏季到秋季, 植被减少类型向高地形区(>500m, >6°) 移动, 而植被增加类型则向低地形区(<500m, <6°) 移动; 从秋季到冬季, 植被减少和增加类型均在向高地形区移动, 在高地形区, 植被减少(>1300m, >15°) 分布强于植被增加(>500m, >6°), 在低地形区则是植被减少(<1300m, <15°) 分布弱于植被增加(<500m, <6°)。(4) 在坡向的分布上, 除了平地区域外, 植被变化幅度在北、东、南、西坡向上随季节变化不明显。

【关键词】: 植被覆盖度; MODIS-EVI; 趋势分析; 地形分布指数; 季节变化

【中图分类号】: P966 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)12-2146-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201712024

植被是陆地环境重要的生态因子, 对物质循环和能量传递起着重要作用, 是生态环境变化的“指示器”^[1~4]。植被覆盖度

¹ 收稿日期: 2016-12-25; 修回日期: 2017-04-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAC01A16, 2011BAC09B01) [National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2006BAC01A16, 2011BAC09B01)]; 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA0002) [Key Program of the Natural Science Foundation of Chongqing(CSTC2009BA0002)]

作者简介: 朱林富(1985~), 男, 博士研究生, 研究方向为区域环境与应用地理. E-mail: 156340810@qq.com

***通讯作者** E-mail: xiesy@swu.edu.cn

在很大程度上反映了区域生态环境状况，是研究生态、气候和水土保持等问题的基础数据^[3, 5, 6]，也是衡量岩溶地区石漠化的基础指标^[7]。我国西南岩溶地区植被退化、土壤流失、基岩裸露，出现了严重的石质荒漠化现象^[8]。近 20a 来，为了保护脆弱的岩溶生态环境，国家大力推进天然林保护、退耕还林还草等生态治理工程^[9, 10]。植被覆盖动态监测便是评价生态治理成效的主要内容。传统的地面测量费时费力、局限大、难推广，难以进行大区域监测^[5, 6, 11]。遥感技术的发展，实现了实时、动态和连续的监测，使大范围的植被覆盖监测成为可能^[5, 6]。

MODIS 植被指数产品包括 NDVI 和 EVI，它们都能反映植被生长变化情况，NDVI 是目前使用较多的数据^[12~14]。相比于 NDVI，EVI 改进了算法和合成方法^[12, 15, 16]，减小了大气、土壤背景和异常值的影响，解决了 NDVI 易饱和的问题^[17, 18]，不仅能更好地反映高覆盖区域植被的生长变化^[16]，还能对稀疏地区的植被覆盖进行很好的区分^[19]，尤其是在反映岩溶地区植被特征时更具有客观性，更适合岩溶地区植被监测^[13]。它的广泛应用必将推动涉及植被生长监测的生态、环境、农业等领域的发展进步^[16]。

重庆位于四川盆地东部，是国家“一带一路”和长江经济带的联结点，是长江流域重要的生态屏障和全国水资源战略储备库。重庆城乡、地区间差异大，大城市、大农村、大库区、大山区并存，岩溶地貌广布，生态环境脆弱，三峡库区生态风险防控难度大，扶贫与环境保护矛盾突出^[9, 10]。加强生态环境保护与建设是中央交给重庆的“四大任务”之一，特别是建设生态文明示范区和长江绿色生态廊道的定位对生态环境治理提出了更高的要求，植被的保护和生态恢复评价显得十分迫切而重要。重庆地形地貌复杂，水热分布地域差异大，植被变化季节性较为突出^[20, 21]，垂直地带性明显，动态监测难度较大^[9, 10]。目前，已有许多学者研究过植被变化，多集中在 NDVI 年际变化与气候^[3, 4, 7, 14, 20, 22]、地形^[10, 23]、人类活动^[3, 7, 10, 24]等的关系方面，而运用 EVI 在长时序上考虑地形差异来分析植被覆盖季节变化空间分布特征的研究还较少^[6, 9, 15, 21]。因此，本研究选取 MODIS-EVI 数据，采用趋势分析结合地形分布指数法分析重庆植被覆盖的季节变化特征，揭示植被变化季节差异性和空间分布特征，以期能更好地为石漠化地区的生态环境治理和植被生态恢复评价提供参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

重庆地处青藏高原与长江中下游平原的过渡地带，105° 11′~110° 11′E、28° 10′~32° 13′N。东邻湖北和湖南，南接贵州，西、北连四川、陕西，幅员面积 82402.95km²。境内主要山脉有大巴山、巫山、武陵山、大娄山，河流有长江、嘉陵江等，长江干流自西向东，形成了著名的长江三峡。

重庆以丘陵、山地为主，地貌分异明显，岩溶地貌广布。地势起伏大，海拔最低 73.1m，最高 2797m，相对高差 2723.9m。地势由南、北往长江河谷逐级降低，东部、东南部和南部多在 1500m 以上，西部多为 300~400m。自然植被以常绿阔叶林为主，还有针叶林、竹林和常绿阔叶灌丛等类型。

重庆亚热带季风湿润气候显著，四季分明，光温水同季，冬暖、夏热、春早、秋凉，多云雾、少霜雪。年均温 13~19℃，春季 16℃左右，夏季 25℃左右，秋季 17℃左右，冬季 7℃左右。降水量丰沛但分布不均，具有明显的季节变化，春季约占 30%，夏季约 40%，秋季约 20%，冬季约 10%。年日照时数 1000~1400h，为中国年日照最少的地区之一。气候地域差异大，立体气候显著，气候资源丰富，气象灾害频繁。

重庆地质灾害点多面广，部分地区土壤污染较重，乱砍乱伐、填埋河道以及工业开发建设活动造成了严重的生态破坏，石漠化、水土流失严重，三峡库区环境风险源量大面广。近 20a 来，重庆积极推进三峡库区生态保护、退耕还林还草、高山生态移民、天然林保护、水土保持与石漠化治理、矿山复垦、水资源保护与水生态修复、园林绿化等生态保护与建设工程，全市生态环境保护力度不断加强，生态环境质量持续改善。

1.2 数据来源及处理

本研究采用的 MODIS 数据从位于美国地质调查局地球资源观察和科学(EROS)中心的宇航局的陆地过程分布式数据档案中心(LPDAAC)下载获得。数据为 Terra 卫星的 MOD13Q1, 格式为 EOS-HDF, 包括 16d 合成的 250m 分辨率的 NDVI 和 EVI。研究中选取 2000 年 3 月至 2016 年 2 月的 EVI 数据, 每年 23 期, 共 368 期影像。首先采用美国国家航空航天局(NASA)提供的 MRT 软件进行批量拼接、地理几何校正和重采样, 转化为 WGS-84-UTM-zone-48 坐标、Tiff 格式的影像。然后以研究区边界为掩膜进行裁剪, 生成重庆 EVI 影像。为了消除数据中可能存在的误差, 将每年 23 期影像数据按季节划分为春(5~9 期)、夏(10~15 期)、秋(16~21 期)、冬(22~4 期)四季, 再进行最大值合成(MVC)得到 2000~2015 年共 64 期重庆季最大值 EVI 影像, 最后根据像元二分模型计算植被数覆盖度。

DEM 数据采用 ASTERGDEM V2, 30m 分辨率, 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>), 经过拼接、投影转换、重采样和裁剪, 得到 250m 分辨率、WGS-84-UTM-zone-48 坐标的重庆 DEM 图。为了方便分析比较, 结合实际和相关成果^[25, 26], 将生成的高程图、坡度图和坡向图进行分级。在进行高程分级时, 把 200m 以下和 1500m 以上各作为一级, 200~1500m 之间按间隔 100m 进行分级, 共 15 级。根据国土资源部颁发的《第二次全国土地调查技术规程》, 将坡度划分为 $\leq 2^\circ$ 、 $2^\circ \sim 6^\circ$ 、 $6^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $> 25^\circ$ 共 5 级。根据相关研究^[23], 将坡向数据划分为平地、北坡($315^\circ \sim 45^\circ$)、东坡($45^\circ \sim 135^\circ$)、南坡($135^\circ \sim 225^\circ$)、西坡($225^\circ \sim 315^\circ$), 即阴坡、半阴坡、阳坡、半阳坡。

2 研究方法

2.1 像元二分模型

像元二分模型的理论假设是某个像元所包含的信息为土壤与植被两部分^[27], 即传感器观测到的信息 S 是由土壤的信息 S_{soil} 与绿色植被的信息 S_{veg} 两部分组成, 即:

$$S = S_{soil} + S_{veg} \quad (1)$$

式中: S_{soil} 是指纯土壤的像元值; S_{veg} 则是指纯植被的像元值。该模型在一定程度上减少大气、土壤背景等的影响, 不受地域的制约, 容易推广和使用。根据模型原理, EVI_{soil} 表示没有植被覆盖像元的 EVI 值, 而 EVI_{veg} 表示纯植被像元的 EVI 值, 则可以利用 EVI 计算植被覆盖度^[28], 公式如下:

$$FVC = (EVI - EVI_{soil}) / (EVI_{veg} - EVI_{soil}) \quad (2)$$

EVI_{soil} 理论上多数情况下应该约等于零, 但在不同地表环境, EVI_{soil} 变化范围一般为 $-0.1 \sim 0.2$ ^[5]。同理, EVI_{veg} 受植被类型、季节变化等影响, 也会变化。因此, 采用某一确定的 EVI_{soil} 和 EVI_{veg} 值, 显然是不准确的。根据影像数据和实际情况^[7, 28], 本研究选取 0.5% 的置信度, 即累积百分比 0.5% 的为纯土壤像元, 99.5% 的为纯植被像元, 其对应的 EVI 值分别为 EVI_{soil} 和 EVI_{veg} 。

2.2 趋势分析

趋势分析是对一组随时间变化的序列数据进行回归分析, 以此来预测其变化态势^[11, 22, 28]。本研究采用最小二乘拟合直线来表示植被覆盖的变化趋势, 其斜率公式如下:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times FVC_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中: i 是 1~16 的年序号; FVC_i 是第 i 年某季节的植被覆盖度。某个像元的趋势线代表了这个像元 16a 来的植被覆盖度变化趋势^[11, 23], $\theta_{slope} > 0$ 表示植被增加, 反之则是减少, $\theta_{slope} = 0$ 表示无变化。对斜率进行 F 显著性检验^[22], 将变化趋势分为不显著 ($F < 4.6$) 和显著 ($F > 4.6$) 两种。然后将变化趋势图和检验图进行叠加, 把变化趋势分为显著减少、基本不变和显著增加 3 种类型^[23]。

2.3 分布指数

地形条件不同, 植被的变化特征也会有差异。为了消除地形分段和植被变化类型面积差异的影响, 可以采用地形分布指数来描述不同植被变化类型在不同地形条件下的分布情况^[25, 26, 29], 其计算公式如下:

$$P = \left(\frac{S_{ie}}{S_i} \right) \times \left(\frac{S}{S_e} \right) \quad (4)$$

式中: S_{ie} 是 e 地形条件下 i 植被变化类型的面积; S_i 是研究区内 i 植被变化类型的面积; S_e 是研究区内 e 地形条件的面积; S 是研究区面积。分布指数是一个无量纲的标准化指数, 对于植被变化空间分布具有很好的指示意义^[26]。若 $P > 1$, 表示在 e 地形下该植被变化类型分布呈现优势地位, P 越大, 则优势越明显; 若 $P < 1$, 表示在 e 地形下是该植被变化类型分布表现为非优势地位^[29]。

3 结果与分析

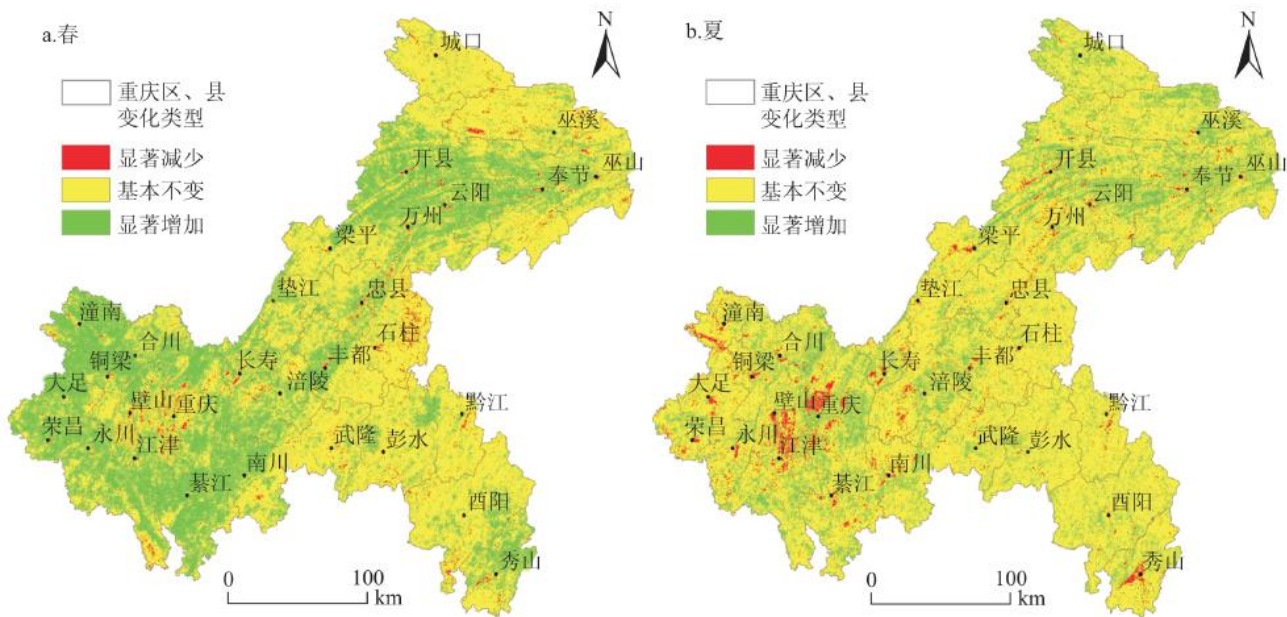
3.1 植被覆盖变化趋势

重庆 2000~2015 年植被覆盖度时间序列分析显示, 在不同的季节, 植被覆盖变化趋势差异明显。从表 1 可知, 近 16a 来, 植被覆盖变化以不变类型为主, 为 80.39%; 增加类型次之, 为 16.10%; 减少类型最低, 为 3.51%。其中:在植被减少类型中, 春季最低 (1.90%), 冬季最高 (6.33%); 植被不变类型中, 除了春季 (66.60%) 外, 其余均高于 80%; 植被增加类型中, 从春季到冬季逐渐降低, 春季为 31.50%。由此表明, 2000~2015 年, 重庆植被变化类型有着明显的季节差异, 减少类型主要发生在冬季, 不变类型以秋季为主, 增加类型主要在春季, 说明植被的变化类型易受季节变化影响。

表 1 植被覆盖季节变化比例

变化类型	春季	夏季	秋季	冬季	均值
减少	1.90	3.57	2.23	6.33	3.51
不变	66.60	80.92	88.23	85.81	80.39
增加	31.50	15.51	9.54	7.86	16.10

从图 1 可知，空间分布上，植被减少类型主要分布于河谷、城镇及其周边地区，这些地区受库区蓄水、建设用地扩张影响，因而植被减少明显。其中，冬季，在西部丘陵区及东北中高山地区出现了较大面积的植被减少类型，这可能是受农耕种植活动和冬季降雪等影响。植被增加类型主要分布在西部丘陵区和中部平行岭谷地区，这些地区主要为农业种植区域，同时也是退耕还林的主要地区，植被增加明显。其中，夏季，渝东北中高山地区植被增加类型面积扩大，这些地区主要为草地和林地，其生长达到旺盛期。



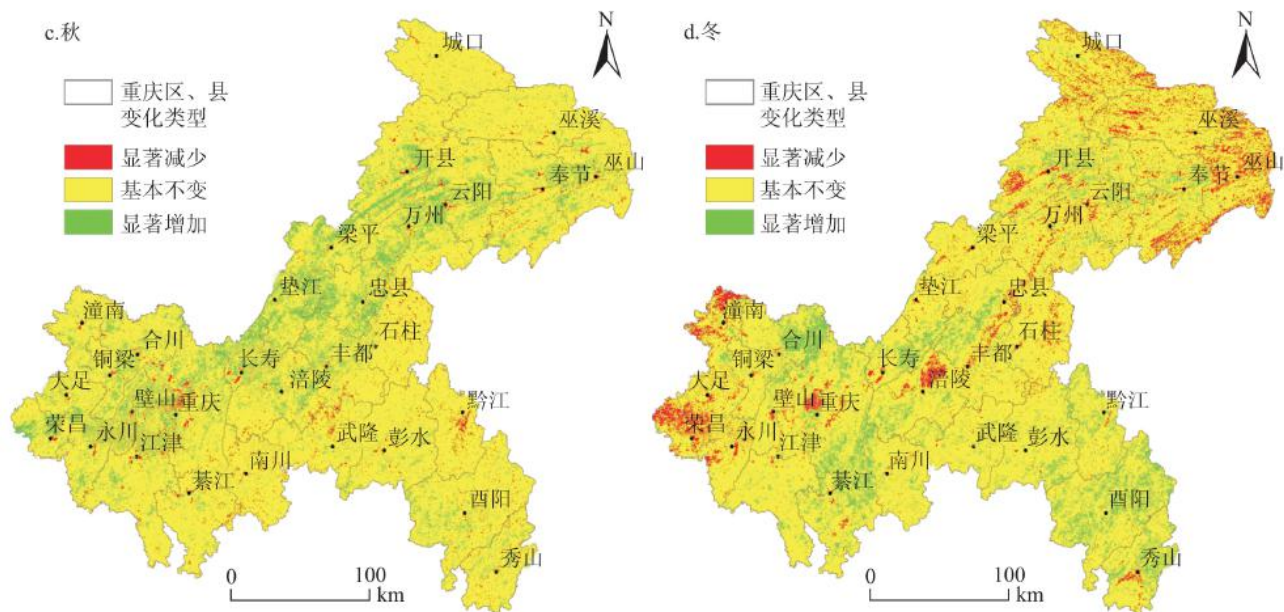


图 1 2000~2015 年重庆植被季节变化趋势空间分布图

Fig. 1 Spatial Distribution of Vegetation Seasonal Change Trend in Chongqing During 2000 –2015

3.2 基于高程的植被季节变化特征

高程的变化，不仅影响气温、水分等的分布，同时还制约着人类活动，这些都会使植被出现垂直分布变化^[9, 10]。

从植被减少类型随高程变化(图2a)可知,分布曲线较为相似,分布指数先降低后增加。分布优势区域为春季1~2级(<300m)、11~14级(1100~1500m),夏季1~3级(<400m),秋季1~2级(<300m)、14~15级(>1400m),冬季1~3级(<400m)、14~15级(>1400m),表明随着春到夏、秋到冬的季节变化,植被减少类型在低海拔区域的分布范围在增加,由1~2级变为1~3级,而高海拔区域的分布范围春到夏则在减少、秋到冬无变化。其中,在1级高程(<200m),春季分布最大(P=8.28),为该区域的主导分布季节,其次是秋季(P=5.82),夏季第三(P=4.84),冬季最低(P=4.46),由于该区域主要为河流、湖泊等水域及消落带,受三峡库区蓄水的影响,植被减少类型分布均很明显;在15级高程(>1500m),冬季分布指数最大(P=2.67),为该区域的主要分布季节,可能是因为该区域主要是中高山地,冬季易受低温雨雪的影响。

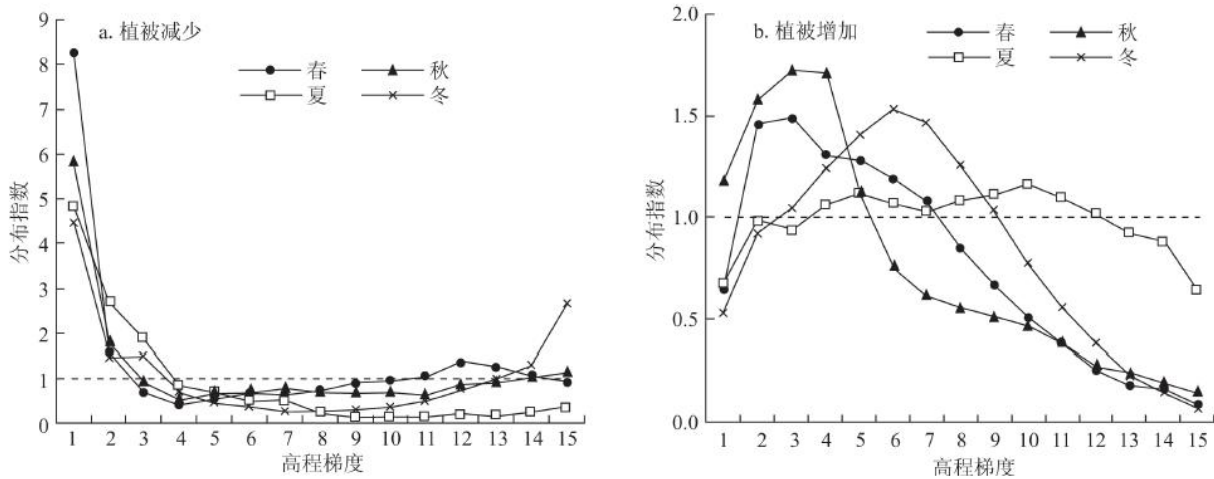


图2 重庆植被变化类型与高程梯度的分布关系

Fig. 2 Relationship Between the Type of Vegetation Change and the Gradient of Elevation in Chongqing

从植被增加类型随高程变化(图2b)可知,分布曲线表现为先增加后减少,分布优势区域是春季2~7级(200~800m),夏季4~12级(400~1300m),秋季1~5级(<600m),冬季3~9级(300~1000m),表明植被增加类型主要分布在较低的海拔区域,随着春到夏、秋到冬的季节变化,分布区域在向高海拔区域移动且范围在扩大。其中,在1~4级高程(<500m),秋季分布为主导;在5~8级高程(500~900m),冬季分布为主导;在9~12级高程(900~1300m),夏季分布为主导;在13级高程以上,分布趋近于0。这是因为在200~1000m的区域主要是城镇、耕地等,该区域建设用地扩张和退耕还林还草的影响明显;在1000m以上,主要为草地、林地,相对比较稳定,分布逐渐减弱。

综上可知,随着海拔的升高,植被变化类型随着四季变化而呈现不同分布趋势。植被增加占主导($P_{增加} > P_{减少}$)的区域为春季3~8级(300~900m),夏季4~15级(>400m),秋季3~6级(300~700m),冬季4~11级(400~1200m);其余区域则是植被减少占主导($P_{减少} > P_{增加}$)。由此看出,植被增加类型主要集中在300~1000m,该区域以耕地为主,人工植被多,也是退耕还林的主要区域,因而植被呈现增加趋势;而植被减少类型则分布在小于300m,该区域主要是城镇、河流、湖泊等,植被减少明显,而高海拔地区的植被减少可能是因为低温雨雪的影响。

3.3 基于坡度的植被季节变化特征

坡度通过影响地表径流参与水分再分配,进而影响土壤特性及分布,同时也制约着人类活动的强度和频度,这些对植被的分布起着重要的作用^[9, 10]。

从植被减少类型随坡度变化(图3a)可知,在1~2级(<6°)坡度,分布指数均大于1,说明在该坡度区域呈优势分布,夏季优势最明显,表明夏季为该坡度区域的主导季节,这是因为该坡度区域内主要是城镇及耕地,以人工植被为主,人类活动频繁,夏季农作物相继收割,导致植被减少分布明显。随着坡度的增加,春、夏、秋季分布指数逐渐降低,冬季先降低后增加,在5级(>25°)坡度,冬季分布指数大于1,说明在该坡度区域冬季为优势分布,这些区域主要是中高山地,可能是受低温雨雪影响。

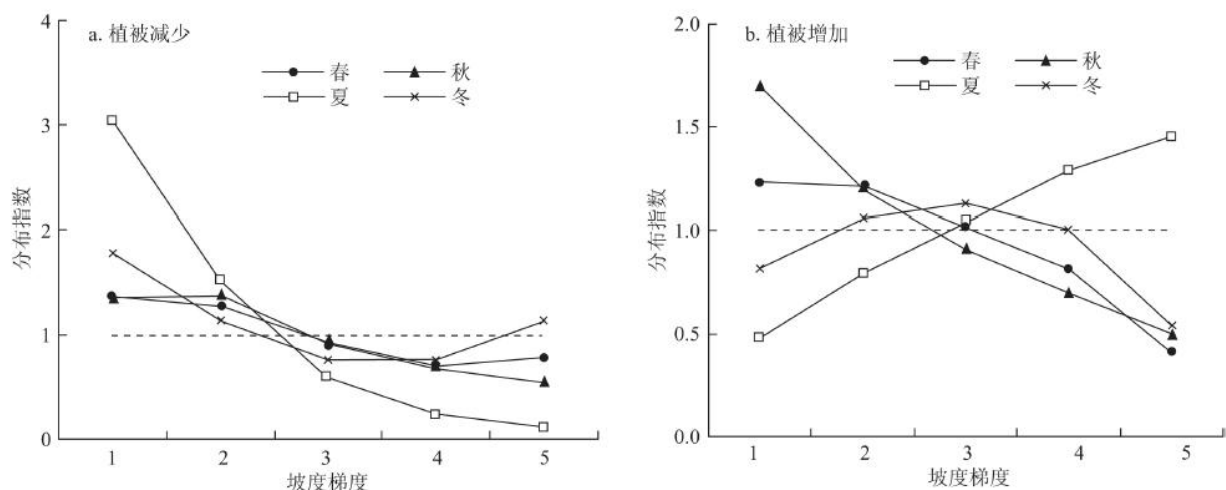


图3 重庆植被变化类型与坡度梯度的分布关系

Fig. 3 Relationship Between the Type of Vegetation Change and the Gradient of Slope in Chongqing

从植被增加类型随坡度变化(图 3b)可知,随着坡度的增加,春、秋季分布指数逐渐降低,夏季分布指数逐渐增加,冬季分布指数先增加后降低。分布优势坡度为春季 1~3 级($<15^{\circ}$),夏季 3~5 级($>6^{\circ}$),秋季 1~2 级($<6^{\circ}$),冬季 2~3 级($2^{\circ} \sim 15^{\circ}$),表明随着春到夏、秋到冬的季节变化,分布在向高坡度区域移动。在 1~2 级($<6^{\circ}$)坡度区域,春、秋季分布优势明显,该区域主要是耕地,农作物轮作影响明显;在 3 级($6^{\circ} \sim 15^{\circ}$)坡度区域,冬季为主;在 4~5 级($>15^{\circ}$)坡度区域,夏季分布优势明显,该区域主要是林地、草地,夏季生长达到旺盛期。

综上可知,在坡度小于 6° 的区域,植被以减少类型为主;在 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区域以植被增加类型为主;在大于 15° 区域植被变化减弱。坡度小于 6° 的区域主要是城镇、耕地及水域等,人工植被分布大,受季节影响明显; $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区域,植被类型开始向灌丛、森林、草地过渡,受退耕还林影响,植被呈现增加趋势;大于 15° 时,主要是灌丛、林地和草地,植被变化减弱、稳定性增加。

3.4 基于坡向的植被季节变化特征

坡向会影响太阳辐射和土壤水分的分布,同时也会影响人类的活动强度,对于植被分布会产生比较明显的影响^[10]。

从植被减少类型变化(图 4a)可知,平地区域分布指数均大于 1,尤其是夏季的分布优势最明显($P=2.54$)。春季除了东坡外,其余坡向分布指数均大于 1;夏季分布优势坡向为西坡,秋、冬季分布优势坡向为南坡。随着坡向的变化,从北坡转向东坡时,春、夏季分布指数降低,而秋、冬季则增加;从西坡转向南坡时,夏季分布指数降低,其余季节则在增加。

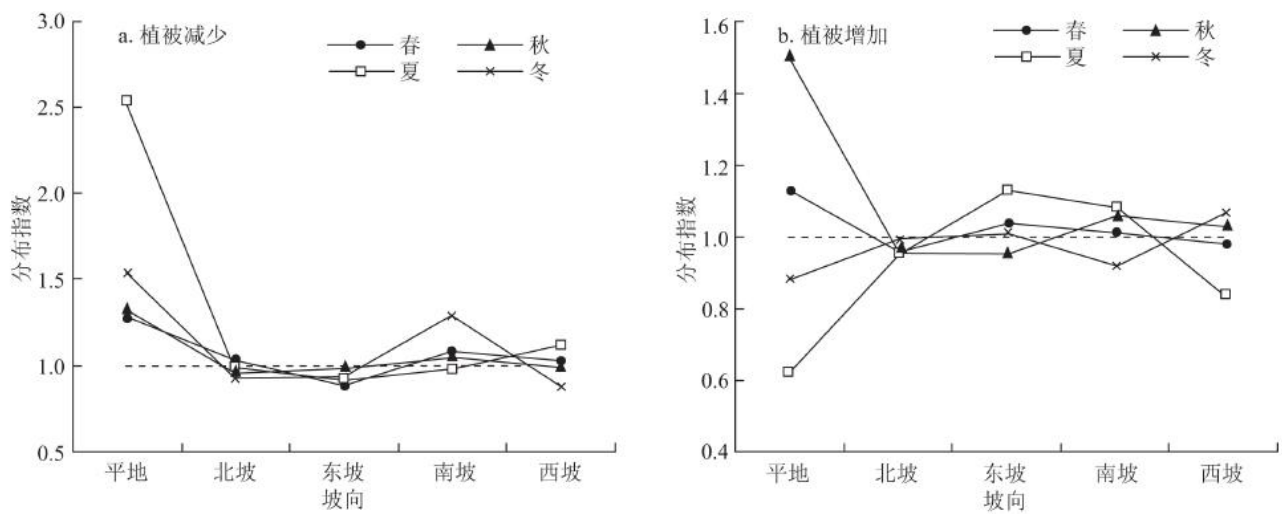


图 4 重庆植被变化类型与坡向的分布关系

Fig. 4 Relationship Between the Type of Vegetation Change and Aspect in Chongqing

从植被增加类型变化(图 4b)可知, 平地区域春、秋季分布指数大于 1, 秋季分布最明显($P=1.51$)。春、夏季的分布优势坡向为东坡和南坡, 秋季优势坡向为南坡和西坡, 冬季优势坡向为东坡和西坡。随着坡向的变化, 从北坡转向东坡时, 秋季分布指数降低, 春、夏、冬季均在增加; 从西坡转向南坡时, 冬季分布指数降低, 春、夏、秋季分布指数均在增加。

综上可知, 植被变化在平地区域变化明显, 在各个坡向的变化幅度较弱。当坡向从阴坡转向阳坡时(北坡→东坡、西坡→南坡), 春、夏季植被处于生长期, 植被表现为增加趋势, 秋、冬季则为减少趋势, 但变化均不明显, 这可能与太阳辐射和人类活动的影响有关。

4 讨论

本研究利用 MODIS-EVI 数据对 2000~2015 年重庆植被覆盖度季节变化的空间分布特征进行了分析, 发现植被变化类型存在较大的季节和空间分布差异。植被减少和增加类型的分布主导季节不同, 这可能是土地利用方式不同, 导致植被种类不同, 从而对季节变化产生的响应不同。低海拔、低坡度区域主要是城镇和耕地, 人工植被为主, 四季农作物的轮作, 使得植被变化明显; 高海拔、高坡度区域主要是林地和草地, 因此植被变化较弱。此外, 植被覆盖从 2000 到 2015 年有着明显的波动变化(图 5), 在空间分布上年际变化与季节之间也存在着明显的差异(图 1、图 6), 由此说明, 单纯的选择以一年或某一季的植被覆盖变化来表征时序植被变化存在一定的偏差或片面性^[21~24], 难以充分体现植被变化的差异性。

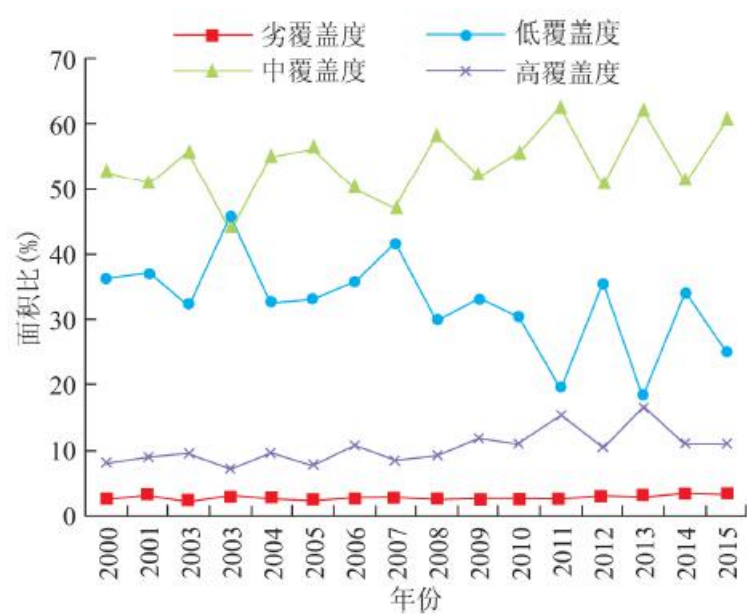


图 5 2000~2015 年重庆植被覆盖变化趋势

Fig. 5 Trend of Vegetation Change in
Chongqing During 2000–2015

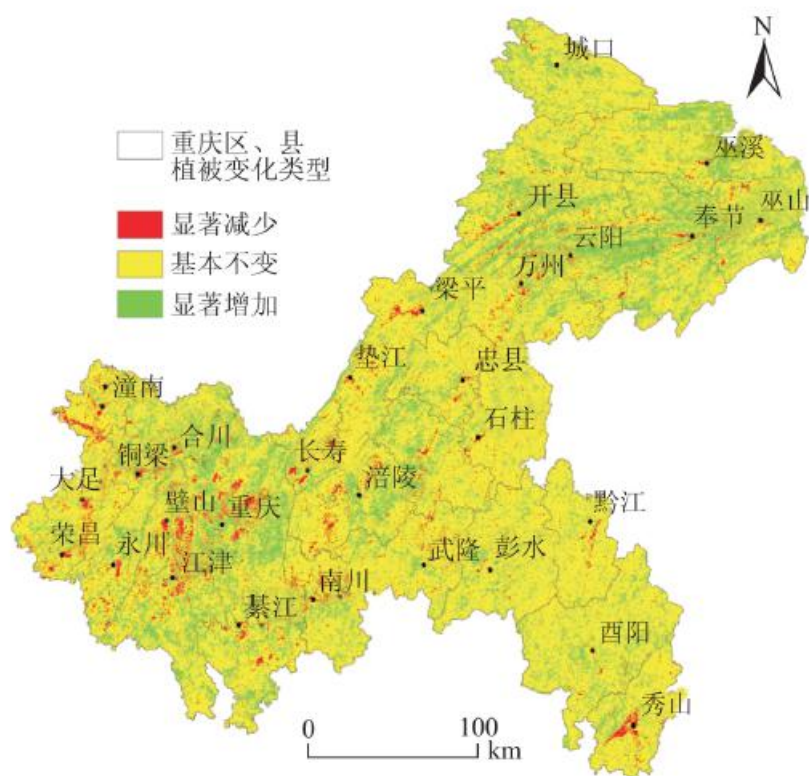


图 6 2000~2015 年重庆植被覆盖变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial Distribution of Vegetation Change
Trend in Chongqing During 2000–2015

本研究借用土地利用分析常用的地形分布指数^[25, 26, 29]来分析了近 16a 来春、夏、秋、冬四季的植被变化空间分布规律,能够更清晰、准确地了解植被变化趋势及特征,对于植被生态恢复的季节空间差异有着一定的参考作用。但目前的 MODIS-EVI 数据的时间尺度还较短,重庆地形复杂,云雾天气多,遥感监测存在诸多的限制,植被的变化影响因素多,机制复杂,且存在时滞效应,要弄清楚还需要更长序列、详尽的数据积累^[9, 10]。还需要指出的是,重庆地域差异大,各地进入春、夏、秋、冬的具体时间略有差异,难免会对结果产生一定的影响,如何能更好地深入分析还有待进一步的研究。

5 结论

(1) 2000~2015 年,重庆植被覆盖变化季节差异性明显。植被减少类型冬季比例最高(6.33%),主要分布于受库区蓄水和建设用地扩张影响的河谷、城镇及其周边地区;植被不变类型秋季比例最高(88.23%);植被增加类型春季比例最高(31.50%),主要分布于农业种植的西部丘陵区和中部平行岭谷地区。

(2) 植被变化类型的优势分布区域不同。在高程上,植被减少类型主要集中于 1~3 级(<400m)和 11~15 级(>1100m),植被增加类型主要集中于 4~10 级(400~1100m);在坡度上,植被以减少类型以 1~2 级(<6°)为主,植被增加类型以 3 级(6°~15°)为主,在 4~5 级(>15°),植被变化较弱。

(3) 随着季节的更替,植被变化类型在不同的地形区间移动。从春季到夏季,植被减少类型在向低地形区(<800m, <6°)

移动, 而植被增加类型则在向高地形区($>800\text{m}$, $>6^\circ$)移动; 从夏季到秋季, 植被减少类型在向高地形区($>500\text{m}$, $>6^\circ$)移动, 而植被增加类型则在向低地形区($<500\text{m}$, $<6^\circ$)移动; 从秋季到冬季, 在高地形区, 植被减少($>1300\text{m}$, $>15^\circ$)分布强于植被增加($>500\text{m}$, $>6^\circ$), 在低地形区则是植被减少($<1300\text{m}$, $<15^\circ$)分布弱于植被增加($<500\text{m}$, $<6^\circ$)。

(4)在坡向的分布上, 除了平地区域外, 植被变化幅度随季节变化较弱, 这可能是像重庆这样降水、热量丰富的地区, 坡向的变化还不足以限制植被的生长变化。

参考文献:

[1] CUI L, SHI J. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2) : 163—176.

[2] 高江波, 吴绍洪, 蔡运龙. 区域植被覆盖的多尺度空间变异性——以贵州喀斯特高原为例 [J]. 地理研究, 2013, 32(12) : 2179—2188.

【GAO J B, WU S H, CAI Y L. Investigating the spatial heterogeneity of vegetation cover at multi-scales: a case study in karst Guizhou Plateau of China [J]. Geographical Research, 2013, 32(12) : 2179—2188. 】

[3] 刘宪锋, 杨勇, 任志远, 等. 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化 [J]. 中国沙漠, 2013, 33(4) : 1244—1249.

【LIU X F, YANU Y, REN Z Y, et al. Changes of vegetation coverage in the Loess Plateau in 2000 — 2009 [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4) : 1244—1249. 】

[4] 陈效速, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化 [J]. 地理学报, 2009, 64(1) : 84—94.

【CHEN X Q, WANG H. Spatial and temporal variations of vegetation belts vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003 [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(1) : 84—94. 】

[5] 马娜, 胡云锋, 庄大方, 等. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化 [J]. 地理科学, 2012, 32(2) : 251—256.

【MA N, HU Y F, ZHUANG D F, et al. Vegetation coverage distribution and its changes in Plan Blue Banner based on remote sensing data and Dimidiate Pixel Model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(2) : 251—256. 】

[6] 汪权方, 张海文, 孙杭州, 等. 基于时序 MODIS /NDVI 影像的鄂东南低山丘陵区植被覆盖度季节变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(8) : 884—889.

【WANG Q F, ZHANG H W, SUN H Z, et al. Seasonal variation characteristics of vegetation fraction in the Hilly Southeastern Hubei Province using time-series MODIS 250m NDVI data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(8) : 884—889. 】

[7] 符静. 2001—2013 年洞庭湖流域植被覆盖度时空变化特征研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015.

【FU J. Spatial and temporal variations of vegetation coverage in the Dongting Lake Basin over the last 13 years(2001 — 2013) [D] . Changsha: Hunan Normal University, 2015. 】

[8] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨 [J] . 中国岩溶, 2002, 21(2) : 101—105.

【WANG S J. Concept deduction and its connotation of Karst Rocky Desertification [J] . Carsologica Sinica, 2002, 21 (2) :101—105. 】

[9] 杨军. 重庆市植被覆盖变化与区域气候要素的关系研究 [D] . 重庆: 重庆师范大学, 2011.

【YANG J. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change in Chongqing [D] . Chongqing: Chongqing Normal University, 2011. 】

[10] 魏来. 重庆市直辖以来植被建设成效及影响因素分析 [D] . 重庆: 重庆师范大学, 2014.

【WEI L. The analysis of vegetation construction result and influence factors in Chongqing since establishing municipality status [D] . Chongqing: Chongqing Normal University, 2014. 】

[11] 李钰澈, 贾坤, 魏香琴, 等. 中国北方地区植被覆盖度遥感估算及其变化分析[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2) : 112—117.

【LI Y W, JIA K, WEI X Q, et al. Fractional vegetation cover estimation in northern China and its change analysis [J] . Remote Sensing For Land & Resources, 2015, 27 (2) : 112 —117. 】

[12] DUTTA D, DAS P K, PAUL S, et al. Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time—series data(2001—2011) [J] . Natural Hazards, 2015, 79(2) : 775—790.

[13] 陈燕丽, 罗永明, 莫伟华, 等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异 [J] . 自然资源学报, 2014(10) : 1802—1812.

【CHEN Y L, LUO Y M, MO W H, et al. Differences between MODIS NDVI and MODIS EVI in response to climatic factors [J] . Journal of Natural Resources, 2014(10) : 1802—1812. 】

[14] OTTO M, HOPFNER C, CURIO J, et al. Assessing vegetation response to precipitation in northwest Morocco during the last decade: an application of MODIS NDVI and high resolution reanalysis data [J] . Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1—2) : 23—41.

[15] QIU B, ZENG C, TANG Z, et al. Characterizing spatiotemporal non-stationary in vegetation dynamics in China using MODIS EVI dataset [J] . Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(11) : 9019—9035.

[16] 李文梅, 覃志豪, 李文娟, 等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析 [J] . 遥感信息, 2010(6) : 73—78.

【LI W M, QIN Z H, LI W J, et al. Comparison and analysis of MODIS NDVI and MODIS EVI [J] . Remote Sensing

Information, 2010(6) : 73—78. 】

[17] 王正兴, 刘闯, HUETE Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI [J]. 生态学报, 2003, 23(5) : 979—987.

【WANG Z X, LIU C, ALFREDO H. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5) : 979—987. 】

[18] 李红军, 郑力, 雷玉平, 等. 基于 EOS /MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(1) : 26—32.

【LI H J, ZHENG L, LEI Y P, et al. Comparison of NDVI and EVI based on EOS /MODIS data [J]. Progress in Geography, 2007, 26(1) : 26—32. 】

[19] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. MODIS /NDVI 和 MODIS /EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(3) : 167—172.

【ZUO L J, ZHANG Z X, DONG T T, et al. Application of MODIS /NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3) : 167—172. 】

[20] 刘灿, 高阳华, 李月臣, 等. 基于 NDVI 的重庆市植被覆盖变化及其对气候因子的响应 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11) : 1514—1520.

【LIU C, GAO Y H, LI Y C, et al. Vegetation coverage change based on NDVI and its relationship with climate factors in Chongqing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11) : 1514—1520. 】

[21] 周峰, 许有鹏, 吕慧华. 基于 MODIS—EVI 数据的长江三角洲地区植被变化的特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(11) : 1363—1369.

【ZHOU F, XU Y P, LV H H. Analysis of the vegetation change in the Yangtze River Delta based on MODIS-EVI timeseries data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(11) : 1363—1369. 】

[22] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. 地理学报, 2012, 67(9) : 1255 —1268.

【MU S J, LI J L, CHEN Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001 —2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (9) : 1255 —1268. 】

[23] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应 [J]. 生态学报, 2014, 34(12) : 3425—3434.

【TONG X W, WANG K L, YUE Y M, et al. Trends in vegetation and their responses to climate and topography in northwest Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (12) : 3425 —3434. 】

[24] LEVIN N. Human factors explain the majority of MODIS-derived trends in vegetation cover in Israel: a densely populated country in the eastern Mediterranean [J]. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(4) : 1197—1211.

[25] 陈利顶, 杨爽, 冯晓明. 土地利用变化的地形梯度特征与空间扩展——以北京市海淀区和延庆县为例 [J]. *地理研究*, 2008, 27(6) : 1225—1233.

【CHEN L D, YANG S, FENG X M. Land use change characteristics along the terrain gradient and the spatial expanding analysis:a case study of Haidian District and Yanqing County, Beijing [J]. *Geographical Research*, 2008, 27 (6) : 1225 —1233. 】

[26] 马士彬, 张勇荣, 安裕伦. 山区城市土地利用动态空间分布特征——以贵州省六盘水市为例 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27(3) : 489—496.

【MA S B, ZHANG Y R, AN Y L. Spatial pattern of urban land use in the mountain area: a case study of Liupanshui in Guizhou Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27 (3) :489—496. 】

[27] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.

【LI M M. The method of vegetation action estimation by remote sensing [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2003. 】

[28] 赵丽苹. 基于 MODIS 数据的喀斯特地区石漠化时空演变特征研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2015.

【ZHAO L P. Study on developmental characteristics of the karst rocky desertification based on MODIS[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. 】

[29] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究 [J]. *地理科学*, 2001, 21(1) :64—69.

【YU H, ZENG H, JIANG Z Y. Study on distribution characteristics of landscape elements along the terrain gradient [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(1) : 64—69. 】