DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2019. 05. 07

岩溶区植被覆盖变化与气候波动的相关性

——以云南石林为例

丁文荣,李玉辉

(云南师范大学 旅游与地理科学学院,云南 昆明 650500)

摘 要: 应对气候变化与植被恢复是岩溶区亟需解决的现实问题。以云南石林岩溶区为对象,采用 1987 - 2017 年的长序列植被指数和气象站点数据,融合 Sens 斜率分析、Morlet 小波分析、偏相关分析与 Mann - Kendall 非参数检测等手段,从时间序列变化的匹配性视角研究岩溶区植被覆盖变化与气候因子波动的相关性。结果表明:研究时段内 4 种植被类型呈现出减少趋势,均存在约 21、11 和 6a 的时间周期,常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林的突变年份发生在 2009 年,而石漠化灌草丛发生于 2004 年;植被 NDVI 与降水量间呈现为正相关关系,与气温呈现为负相关关系,1987 - 2017 年植被 NDVI 的趋势性变化、周期性变化是降水韵律所控制,阔叶林、针阔混交林和针叶林 3 种植被类型的突变由降水量的突变引起,而石漠化灌草丛的突变则由气温的突变引起;石漠化灌草丛较其他植被类型稳定性最差,常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林在气候变化的背景下较石漠化灌草丛更稳定,应对气候变化的能力更强。本研究成果可以为我国南方岩溶区植被恢复与保护提供科学依据。

关键词: 岩溶区; 植被覆盖; 气候波动; 相关性; 云南石林

中图分类号:Q948.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0040-06

The correlation between vegetation cover change and climate fluctuation of karst area:

A case study in Shilin County, Yunnan Province

DING Wenrong, LI Yuhui

(College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Facing the climate change and restoring vegetation is an urgent problem in the karst area. Based on the long-sequence vegetation index and meteorological data from 1987 to 2017 in the karst area in Shilin County, Yunnan Province, the relationship between different vegetation types and climatic and environmental factors was studied by means of Sen's slope analysis, Morlet wavelet analysis, partial correlation analysis and Mann - Kendall non-parametric detection. The results showed that: The four vegetation types showed a decreasing trend during the study period, and there were time periods of about 21, 11 and 6 years, and the mutation years of evergreen broad-leaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest and coniferous forest occurred in 2009, and the rocky desertification shrubs occurred in 2004. There was a positive correlation between vegetation NDVI and precipitation, and a negative correlation with temperature. The cyclical changes are controlled by the rhythm of precipitation, and the mutations of the three vegetation types of broad-leaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest and coniferous forest are caused by the mutation of precipitation, while the mutation of rocky desertification shrub is caused by the abrupt change of temperature. Rocky desertification shrubs have the worst stability compared with other vegetation types. Evergreen broad-leaved forests, coniferous and broad-leaved mixed forests and coniferous forests are more stable than rocky desertification shrubs in the context of climate change. This study can provide scientific basis for vegetation restoration and protection in karst areas of

收稿日期:2019-03-09; 修回日期:2019-06-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41761105)

作者简介:丁文荣(1979-),男,云南昆明人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水文与水资源方面的研究工作。

southern China.

Key words: karst area; vegetation cover; climate change; correlation; Shilin County of Yunnan Province

1 研究背景

陆地植被是自然生态环境的重要组成部分,是 大气、土壤和水分之间的"纽带"。 植被影响着地气 系统的能量平衡,在气候、水文和生化循环中发挥着 重要作用,但同时也是气候和人为因素对环境影响 的敏感性指标[1]。全球气候变暖及其关联效应已 经成为21世纪最重大的环境问题之一,IPCC最新 研究报告指出,1901-2012年全球地表平均温度升 高 0.89 $^{\circ}$ $(0.69 \sim 1.08$ $^{\circ}$) . 过去 30 年中的每个 10年都要比自1850年以来的任何一个10年都更加温 暖[2]。由此,揭示植被与气候变化之间的关系已经 成为全球气候变化研究的重要内容[3-5]。植被指数 可以表征植被状况,能够在较大时空尺度上客观反 映研究区植被覆盖信息,其中归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI) 最为常 用[6]。遥感观测手段具有实时、动态、宏观的特点, 为研究地表植被 NDVI 提供了可靠的数据源^[7]。

退化岩溶区生态环境问题是全球岩溶地质研究中的关键问题之一,是区域可持续发展的严重制约因素,中国西南岩溶区尤为突出^[8]。在气候变化及人类活动综合影响下,岩溶区生态环境问题更为凸显^[9]。应对气候变化与植被恢复成为岩溶区生态环境恢复首要面对的现实需求,然而岩溶区气候变化与植被关系仍不清晰。石林作为剑状喀斯特的标型景观,在长期的开发过程中,对其保护也一直受到重视,具备了从地带性原生植被到石漠化灌草丛的完整植物群落序列。

本文将"3S"技术、数理统计方法融入岩溶区气候变化与植被变化的整体思考中,以长时间变化序列为对象,系统分析植被覆盖与气候变化的相关性,成果不仅是当地生态文明建设的科学依据,也可为岩溶区应对气候变化与植被保护、恢复提供实证。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

石林彝族自治县位于云南高原中部,介于 103° 10′E ~103°41′E、24°30′N ~25°3′N 之间,面积 1 725 km²。地势东北高西南低,海拔多在 1 700 ~1 950 m 之间。地处低纬高原,具有典型的亚热带低纬高原季风气候特征,干湿季分明,多年平均降水量 939.5 mm,降水时间主要集中在 5 - 10 月,占全年降水量

的85%。年平均气温16.3℃,年平均日照2100h,大于10℃的年活动积温4814.6℃,历年平均无霜期252d。2015年监测结果表明,石林县有中度以上石漠化土地面积483.57km²,潜在石漠化面积182.32km²,分别占国土面积的28.75%和10.84%,是滇中石漠化最为严重的区域。然而,石林自1982年起陆续开展土地利用规划调整,城市化、自然保护和保护农田(耕地)、旅游景点建设、石漠化治理或退化岩溶生态系统治理等工程的持续进行,形成了地带性原生植被-针阔混交林-针叶林-石漠化灌草丛的植被类型序列。

本研究依据当地植被演替序列,甄选了4个人 类活动较弱的植被片区为研究对象,4个植被类型 区及气象站点分布见图1。

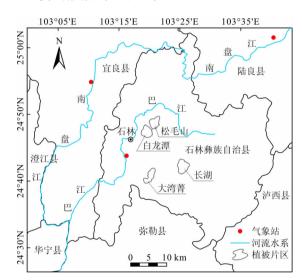


图 1 研究区 4 个植被类型区及气象站点分布

为剔除人类活动的影响并客观反映自然植被覆盖变化与气候的相关性,所选择的区域主要位于山顶或保护区,耕地所占面积低,植被片区特征及恢复状态见表 1。研究片区平均面积为 7.48 km²,最大的是长湖片区,面积 9.05 km²,最小的大湾菁片区面积为 6.67 km²。

2.2 资料来源

选用的核心数据包括石林县 1987 - 2017 年的降水、气温数据和植被 NDVI 数据,其中气象数据来源于石林县国家气象站。因旱季植被指数更能反映前期降水对植被的影响^[10],加之研究区生长季节云量高,无法获取连续完整的遥感影像,故本研究采用旱季的植被覆盖数据,所获取的影像均为 1 月份,共 31 期影像。

| 表 1 | 植被 | 片区 | 特征 | 及恢 | 复状态 |
|-----|----|----|----|----|-----|
| | | | | | |

| 植被类型/片区 | 面积/km² | 恢复状态 |
|------------|--------|-----------------------------------|
| 常绿阔叶林/长湖 | 9.05 | 近顶极,60年,长湖景区的核心区、缓冲区范围,无耕地、砍伐等活动 |
| 针阔混交林/大湾菁 | 6.67 | 自然恢复,间伐,植被保护区,有零星拾薪柴活动,零星耕地 |
| 针叶林/松毛山 | 6.73 | 人工辅助恢复,40年,石林景区外围,属退耕还林区,保护良好,无耕地 |
| 石漠化灌草丛/白龙潭 | 7.46 | 践踏、放牧,石林景区用地,人类活动集中于道路周边,耕地少于5% |

2.3 研究方法

- (1) 植被覆盖 *NDVI* 数据提取。从美国地质勘探局(https://glovis. usgs. gov/)的 Landsat4 5TM、Landsat7 ETM SLC 及 Landsat 8 OLI 的 30m 分辨率卫星数字产品中筛选出合适的 1 月遥感影像,在ENVI 5.3 软件的支持下进行辐射定标和大气校正,并进行植被 *NDVI* 计算,然后在 ArcInfo 10.3 中提取不同类型的植被片区范围及 *NDVI* 属性值。
- (2)变化趋势分析。变化趋势分析采用 Sen's 斜率法,作为非参数方法, Sen's 斜率可以较好地减少噪声对序列变化趋势的干扰。 Sen's 斜率 β 表示待分析时间序列的平均变化率以及时间序列的趋势。当 $\beta>0$ 时,序列呈上升趋势;当 $\beta=0$ 时,序列趋势不明显;而当 $\beta<0$ 时,系列呈下降趋势[11]。对于时间序列 $x_i=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$, Sen's 斜率的计算公式为:

$$\beta = \text{median}(\frac{x_j - x_i}{j - i}), \quad \forall j > i$$
 (1)

式中:Median 为中值函数。

(3)变化周期分析。周期分析采用了小波变换法,该方法通过伸缩平移运算自动适应时频信号的时间变化,计算小波方差后可得到周期和主周期^[12]。本研究采用的母小波为复值 Morlet 小波,具体形式为:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{2\pi f_c^t} e^{-t^2/f_b}$$
 (2)

式中: f_b 为带宽; f_c 为中心频率; i 为虚数。若令 f_b = $2,\omega = 2\pi f_c$,则复值 Morlet 小波的伸缩尺度 a 与 Fourier 分析中周期 T 的关系为:

$$T = \frac{4\pi a}{\omega + \sqrt{2 + \omega^2}} \tag{3}$$

从公式(3) 中可以看出,当 $\omega = 6.2$ 时,T 可以近似地用 α 来代替。

(4)偏相关分析。植被 NDVI 变化往往是多个要素相互影响、制约的结果,偏相关分析法为剥离出某个要素变化对因变量的作用提供了一种有效的方法。偏相关分析以控制变量将其他要素视为常数,

可以有效排除要素自身相关的影响。通过偏相关系数与相关系数的比较,来确定两个变量之间的内在线性联系会更真实、可靠。本研究中*NDVI*与气温、*NDVI*与降水的偏相关系数计算分别写为:

$$R_{vt.r} = \frac{R_{vt} - R_{vr} \cdot R_{tr}}{\sqrt{(1 - R_{vr}^2)(1 - R_{tr}^2)}}$$
(4)

$$R_{vr,t} = \frac{R_{vr} - R_{vt} \cdot R_{rt}}{\sqrt{(1 - R_{vt}^2)(1 - R_{rt}^2)}}$$
 (5)

偏相关计算结果采用 t 检验进行显著性分析, 计算公式为:

$$t = \frac{R}{\sqrt{1 - R^2}} \sqrt{n - m - 1} \tag{6}$$

式中:R 为偏相关系数;n 为样本数;m 为自变量。

此外,气象数据、植被 NDVI 时间序列变化趋势的显著性检验及突变年份确定采用 Mann – Kendall 非参数检验法 [13] ,序列总体离散程度分析采用变差系数 C_V 值 [14] 。

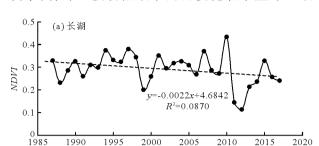
3 结果与分析

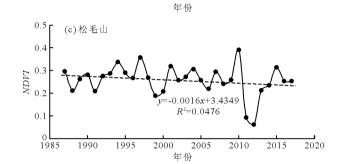
3.1 植被覆盖变化特征

通过遥感影像解译得到各年旱季植被 NDVI 后,分别提取每种植被类型的 NDVI 属性值,得到 1987 - 2017 年植被 NDVI 时间序列(图 2),在此基 础上计算相关指数。由图 2 可看出,多年旱季植被 NDVI 主要波动于 0.15~0.29 之间,其中常绿阔叶 林的长湖片区最高,均值达0.29,而石漠化灌草从 的白龙潭片区最低,均值仅为0.15。自1987年以 来4个片区植被 NDVI 均存在明显的波动变化特 征,且最高值均出现在2010年而最低值则出现在 2012年。进一步采用 Sen's 斜率计算后发现,1987 -2017 年不同植被类型的变化趋势均呈现出减少 的趋势(表2),其中针阔混交林的大湾菁减少速率 为 $-0.33 \times 10^{-2}/a$,变化趋势达到了显著的水平,而 其余三者的减少趋势尚未达到显著的水平。此外, 对 4 种植被类型的 NDVI 趋势与 Sen's 斜率的相关性 进行统计分析后发现,两者的相关系数为-0.68,即

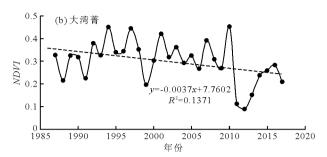
植被覆盖率越高的植被类型,减少的趋势越明显。

从变差系数 C_v 值的变化来看,1987 - 2017 年 4 种植被类型区的 C_v 值波动于 0.23 ~ 0.31 之间,常绿阔叶林片区波动性最小而石漠化灌草从片区最





大。对植被 NDVI 与 C_v 值的关系进行相关分析后 发现,植被 NDVI 与变差系数 C_v 值的相关系数为 -0.63,达 0.05 的显著性水平,这说明植被覆盖越高的片区离散程度越小,即稳定性越好。



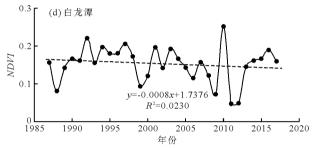


图 2 1987 - 2017 年 4 种植被类型 NDVI 演变过程

表 2 1987 - 2017 年 4 种植被类型 NDVI 变化特征

| 植被类型 | 植被片区 | NDVI | Sen's 斜率/(10 ⁻² a ⁻¹) | 周期/a | 突变年份 | C_V 值 |
|--------|------|-------|--|-----------------------|------|---------|
| 常绿阔叶林 | 长湖 | 0.29 | -0.22 | 21 \11" \6 | 2009 | 0.23 |
| 针阔混交林 | 大湾菁 | 0.27 | -0.33 * | 21,12 [#] ,6 | 2009 | 0.30 |
| 针叶林 | 松毛山 | 0.26 | -0.11 | 21,12 [#] ,6 | 2009 | 0.26 |
| 石漠化灌草丛 | 白龙潭 | 0. 15 | -0.07 | 21"、12、6 | 2004 | 0.31 |

注:*为达到0.05显著性水平,#为第一主周期。

以 Morlet 小波作为母小波进行连续变换并计算小波方差后得知,4 种植被类型片区均存在约 21、12 和 6 a 左右的 3 个时间周期(图略),但第一主周期存在差异。其中常绿阔叶林第一主周期为 11 a,针阔混交林、针叶林的第一主周期约为 12 a,石漠化灌草丛的白龙潭片区的第一主周期却为 21 a。这表明岩溶区植被覆盖变化过程存在多时间尺度特征及非同步性。

采用 Mann - Kendall 非参数检验法进行突变年份分析后得知,在 0.05 的置信水平下,常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林的突变年份集中在 2009 年,而石漠化灌草从则发生于 2004 年,与前三者不同。

3.2 研究区 1987 - 2017 年气候变化特征

气温和降水是影响植被覆盖的最根本的因素, 两者之间存在的紧密联系。研究时段内石林县年降 水均值为 909.0 mm、年平均气温为 16.6℃。自 1987 年至 2017 年,降水量、气温表现出不同的变化 趋势,其中降水量微弱减少而气温则显著升高(图 3),计算两者的 Sen's 斜率并进行 Mann - Kendall 显 著性检验后发现,降水量的 Sen's 斜率为 1.97 mm/a,变化未达到 0.05 的显著性水平,而气温的 Sen's 斜率为 0.05℃/a,达 0.05 的显著性水平。

Morlet 小波方差的周期分析结果揭示了在 0.05 的信度水平下,降水存在 21、12 和 7 a 的时间韵律,其中第一主周期为 21 a。而气温则仅存在 26 和 21 a 的周期性特征,其中 26 a 为第一主周期。 Mann - Kendall 突变年份检验结果表明,在 0.05 置信度水平下,降水的突变发生在 2009 年,而气温则发生在 2001 年。

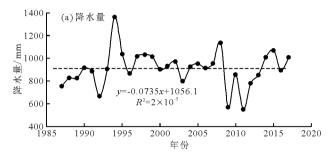
此外,降水、气温的变差系数 C_V 值分别为 0.17 和 0.04,可以看出气温的离散程度较降水更小,降水的时程波动性更明显。

3.3 植被覆盖变化与气温、降水的相关性

气候对植被覆盖的影响在年内生长期韵律的控制及长期趋势方面都有体现^[15-19]。本研究分别从植被覆盖与气温和降水之间在变化趋势、周期性、突变年份3个方面的时间对应性,来阐释植被覆盖与气候变化的相关性。

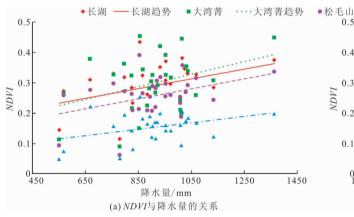
对于变化趋势,不同植被类型 NDVI 与气温、降

水量的关系存在差异(图 4)。首先,4 种植被类型与降水量之间均呈现为正相关关系,其中常绿阔叶林(长湖)、针叶林(松毛山)片区达到 0.05 的置信水平,表明在滇中岩溶区,降雨量的增加,有利于促进植物的生长,从而提高覆盖率。而植被覆盖与气温均为负相关关系,即高温抑制了植物生长,引起植被覆盖出现降低趋势。



18.0 17.5 17.0 16.5 16.0 15.5 15.0 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 年份

图 3 石林县 1987 - 2017 年降水量及气温的变化趋势



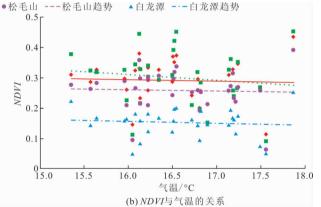


图 4 不同植被类型 NDVI 与降水量及气温的关系

不同植被类型 NDVI 与气温、降水量的偏相关计算结果表明(表3),植被与降水的相关性较气温更强,这说明对于地处亚热带低纬高原的石林而言,热量不是植物生长的限制性因素,植被覆盖的降低趋势是降水量的减少所导致。

表 3 植被 NDVI 与气候因子的偏相关系数

| 植被类型 | 植被片区 | 降水量 | 气温 |
|--------|------|--------|-------|
| 常绿阔叶林 | 长湖 | 0.39* | -0.10 |
| 针阔混交林 | 大湾菁 | 0.37 | -0.18 |
| 针叶林 | 松毛山 | 0.40 * | -0.09 |
| 石漠化灌草丛 | 白龙潭 | 0.37 | -0.14 |

注:* 为达到 0.05 显著性水平。

从周期性来看,剔除误差后植被覆盖变化的平均 周期为21、12和6a,而降水存在21、12和7a的时间 韵律,气温则存在26及21a的时间周期。因气温变 化不存在 12、6 a 的时间周期,故植被覆盖变化在 12、6 年左右的时间周期是由降水所控制的。对于 21 a 时间尺度上的周期性变化,分别将降水、气温及 4 种植被类型在 21 a 时间尺度上的 Morlet 小波系数实部提取出来(图 5)。从图 5 可以看出,21 a 时间尺度上降水量峰值为 1998 年、最小值为 2008 年,气温的高温中心在 2002 年,而低温中心分别为 1993 和 2012年。将降水量、气温在 21 a 时间尺度上的峰值、最小值与 4 种植被类型的 NDVI 序列进行比对后可以清晰看出,植被 NDVI 在 21 a 上的周期性变化也是由降水量所主导。综上所述,植被覆盖的周期性变化主要由降水的周期性韵律所控制。

从突变年份来看,常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林 3 种植被类型的突变年份集中于 2009 年,而石漠化灌草丛则发生在 2004 年。由于降水量的突变年份发生在 2009 年,而气温则发生在 2001 年。综

合比对突变年份的对应关系后可以看出,阔叶林、针 阔混交林和针叶林3种植被类型与降水量的突变年 份一致,突变由降水量的突变所引起,而石漠化灌草 丛则与气温的突变年份一致,突变由气温的突变所引起。这表明了不同植被类型对气候因子的响应存在差异。

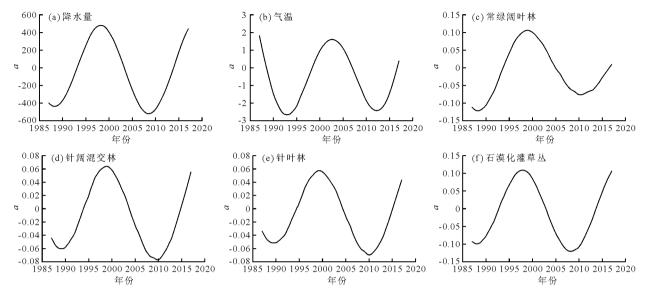


图 5 1987 - 2017 年气候因子与植被 NDVI 的 Morlet 小波系数实部变化

4 结论与展望

从典型岩溶区石林 362 幅 Landsat4 - 5TM、Landsat7 ETM SLC及 Landsat 8 OLI的 30 m 分辨率 遥感影像中筛选出 1987 - 2017 年最佳的影像,结合气候数据进行岩溶区植被覆盖与气候环境因子的相关性对照分析,得到以下结论:

- (1) 植被 NDVI 主要波动于 0.15~0.29 之间,4 种植被类型呈现出减少趋势。不同植被类型均存在约 21、11 和 6 a 的时间周期,但第一主周期存在差异。常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林的突变年份发生在 2009 年,而石漠化灌草从发生于 2004 年。
- (2) 植被 NDVI 与降水量均呈现为正相关关系,与气温呈现为负相关关系,植被 NDVI 与降水量的相关性较气温更强。1987 -2017 年植被 NDVI 呈降低趋势是降水量的减少而导致,植被覆盖的周期性变化是降水的周期性韵律所控制。阔叶林、针阔混交林和针叶林 3 种植被类型的突变由降水量的突变引起,而石漠化灌草丛则由气温的突变引起。
- (3)常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林在气候 变化背景下更为稳定,应对气候变化的能力更强,石 漠化灌草从较其他植被类型稳定性最差。

气候变化与植被恢复是岩溶区面临的重要环境 问题,本研究获得了岩溶区长序列植被 NDVI,且所 选植被片区位于保护区或山脊区,较大程度剔除了 人类活动的影响,具有较高的可靠性。从均值时间 序列变化角度发现,岩溶区植被中常绿阔叶林的自 我调节能力最强,稳定性最好,而石漠化灌草丛最 差,这为研究区植被恢复与保护提供了科学依据。 但近年来极端气候频发,不同植被类型响应极端气 候的特征,尤其是极端干旱期的维持、干旱后的恢复 规律仍不清楚,有待今后进一步研究。

参考文献:

- BONAN G. Ecological climatology: concepts and applications
 Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] PENG Shushi, PIAO Shilong, CIAIS P, et al. Asymmetric effects of daytime and night time warming on Northern Hemisphere vegetation [J]. Nature, 2013, 501 (7465):88 92.
- [4] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, et al. Climate – driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. Science, 2003, 300 (5625):1560 – 1563.
- [5] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报,2018,38(6):2229-2238.
- [6] 张远东,张笑鹤,刘世荣. 西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析[J]. 应用生态学报,2011,22(2);323-330.

(下转第51页)

- [23] 李立铮. 上海市非常规水源利用现状及发展对策[J]. 中国水利, 2017(11);11-13.
- [24] 刘月玲. 谈城市中水回用[J]. 山西建筑, 2013, 39 (20):115-118.
- [25] 胡 坤. 城市区域内雨水水质评价及其利用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [26] 车 伍,刘 燕,李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制 [J]. 给水排水,2003,29(10):38-42.
- [27] 高习伟,姜允芳. 上海市 1971 2010 年降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):48 53,60.
- [28] 王文佳. 基于"节水优先"的上海市用水量变化趋势分析及预测[D]. 上海: 华东师范大学. 2018.
- [29] 那 健. 城市雨水利用模式研究与工程示范[D]. 西安: 西安理工大学. 2017.
- [30] 段 涛,刘晓君. 城市再生水的需求分析[J]. 生态经济, 2007(4):151-153.

- [31] 顾圣华. 上海市水资源特征[J]. 水文, 2002,22(5):40-43.
- [32] 孙素艳,李云玲,郭东阳,等.河北省供用水现状及水资源平衡分析[J].水利规划与设计,2018(10):62-67.
- [33] 张聪宇. 青岛市水资源供需预测与利用研究[J]. 中国高新技术企业, 2016(15):123-124.
- [34] 朱永彬, 史雅娟. 中国主要城市水资源价值评价与定价研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5):1040 1050.
- [35] 宋进喜,李怀恩,李 琦. 城市雨水资源化及其生态环境效应[J]. 生态学杂志, 2003, 22(2):32-35.
- [36] 袁再健,梁 晨,李定强. 中国海绵城市研究进展与展望 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(5):896-901.
- [37] 张思源. 基于海绵城市的城市绿地系统设计与应用 [J]. 低碳世界, 2018(12):192-193.
- [38] 朱永彬, 史雅娟. 中国主要城市水资源价值评价与定价研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5):1040-1050.

(上接第45页)

- [7] 吴志杰,何国金,黄绍霖,等.南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J].遥感学报,2017,21(1):159-167.
- [8] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.
- [10] WU Xiuchen, LIU Hongyan, LI Xiaoyan, et al. Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate Northern Hemisphere [J]. Glob Change Biol, 2017,24(1):1-13.
- [11] SEN, KUMAR P. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.
- [12] 王文圣,丁 晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [13] MANN H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3):245-259.

- [14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [15] 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[J].生态学报,2017,37(12):4008-4018.
- [16] 马士彬,安裕伦,杨广斌. 喀斯特地区不同植被类型 *NDVI* 变化及驱动因素分析——以贵州为例[J]. 生态 环境学报,2016,25(7):1106-1114.
- [17] 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.
- [18] 何云玲,李同艳,熊巧利,等. 2000 2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J]. 生态学报,2018,38(24):8813 8821.
- [19] 祝 聪,彭文甫,张丽芳,等. 2006 2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 生态学报,2019,39 (5):1583 1594.