

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第34卷第5期 2014年3月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据..... 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析..... 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....  
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....  
..... 陈旭飞,张池,戴军,等 (1114)

### 个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李勇,袁玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡婷,谷洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响..... 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响..... 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李西,王丽华,刘尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....  
..... 李倩倩,赵旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周蓉,邓自发 (1224)

### 种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埭埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓异,蔡立哲,郭涛,等 (1244)

- 不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响…………… 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253)
- 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子…………… 陆欣鑫,刘 妍,范亚文 (1264)
- 江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价…………… 李 佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)

### 景观、区域和全球生态

- 中国自然保护综合地理区划…………… 郭子良,崔国发 (1284)
- 近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应 …………… 缪丽娟,蒋 冲,何 斌,等 (1295)
- 人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响 …………… 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302)
- 2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化 …………… 淡永利,王宏志,张 欢,等 (1311)

### 资源与产业生态

- 三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布…………… 李 芬,吴志丰,徐 翠,等 (1318)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 282 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-03



**封面图说:** 插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人和大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201306091533

高云, 谢苗苗, 付梅臣, 曹翊坤. 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例. 生态学报, 2014, 34(5): 1094-1104.

Gao Y, Xie M M, Fu M C, Cao Y K. Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China: a case study in Xining. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1094-1104.

## 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素 ——以青海省西宁市为例

高 云, 谢苗苗\*, 付梅臣, 曹翊坤

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘要:**高原型河谷城市具有特殊的自然地理与气候特征,生态环境脆弱,城市化引起的生态环境问题日益突出。植被作为其生态系统的载体,响应更加敏感。深入研究高原型河谷城市的植被变化及其影响因素,对促进西部大开发及城市化健康发展,建立良好的城市人居、生态环境具有重要的现实意义。西宁市作为典型的高原型河谷城市,植被覆盖在城市化与退耕还林(草)政策共同作用下变化明显。基于植被-不透水表面-土壤(V-I-S)模型,以西宁市城市规划区 1995 年与 2009 年两期 landsat TM 影像为数据源,利用线性光谱混合模型进行混合像元分解,获取研究区植被覆盖度的空间分布。通过整体分析、转移矩阵分析、格网分析等技术手段,研究植被时空变化特征并分别探讨川道与丘陵植被变化的影响因素。结果表明:研究期内,西宁城市规划区平均植被覆盖度维持在 30%左右。2009 年与 1995 年相比植被覆盖度出现下降,植被覆盖空间差异略有减小。在数量上,基本无覆盖、中覆盖、高覆盖等级呈增加趋势,低覆盖、全覆盖呈下降趋势。研究区西北部及西南部丘陵区植被覆盖整体趋于好转,主要由中低丰度植被等级变化而来,原因在于 2000—2005 年湟中县累计退耕还林(草)54.91km<sup>2</sup>,累计造林 247.98km<sup>2</sup>,使研究区西北部植被覆盖等级提高,表明西宁市退耕还林(草)工程对于改善植被覆盖效果明显。同时丘陵区植被变化与气候影响趋势相同,表明其植被变化可能也受气候变化影响。城市扩展方向及强度对其周边植被覆盖的影响突出。市区快速扩张及农业退化使川道内中高丰度植被覆盖整体退化趋势明显。主要原因在于 2000 年后西宁进入快速发展期,城市用地规模迅速增大,川道内城市周边大量中高覆盖等级植被转变为基本无覆盖等级,造成植被退化。川道内城市区域植被变化与气候影响趋势相反,表明本文研究结果可能低估了城市化对川道内植被变化的影响幅度,相比气候影响,人为活动的影响更加强烈。研究区内植被覆盖等级的变化趋势为植被覆盖较差的等级(基本无覆盖和低覆盖)向高一级别发展,得益于退耕还林(草)工程;中等级别以上的覆盖等级出现一定程度的退化,尤其是位于川道中受到城市化干扰的区域植被退化问题尤为突出,需对这些区域采取植被保育措施,避免植被覆盖高等级区域受到城市化影响造成不可逆转的退化。

**关键词:**高原型河谷城市;植被变化;线性光谱混合模型;转移矩阵;西宁市

### Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China: a case study in Xining

GAO Yun, XIE Miaomiao\*, FU Meichen, CAO Yikun

School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** The geographical and climatic characteristics of Plateau Valley-City in the Western China are very typical and fragile. The urban ecosystems and environment have been damaged by urbanization recently years. Vegetation coverage plays a key role in the ecosystem of Plateau Valley-City, and it is very sensitive to urbanization. As a typical plateau Valley-City, Xining experienced rapid urbanization and implemented the policy of Converting Cultivated Land into Forest/Grass at the same time. Study on pattern dynamics of vegetation coverage of Xining urban plan zone and its causative factors is of great

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金(41101175);国家自然科学基金(41171440)

**收稿日期:**2013-06-09; **修订日期:**2013-10-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiemiaomiao@cugb.edu.cn

significance for promoting Western Development and urbanization, and contributes to creating a pleasant urban environment in the Western China. Landsat TM data are the most economical and temporal continuous remote sensing images, however, vegetation pattern analysis on urban scale needs high resolution images. To resolve the problems and provide a more accurate result, Landsat TM data of 1995 and 2009 were unmixed by Linear Spectral Mixing Model (LSMM) in Xining plan zone to calculate proportion of vegetation cover, based on Vegetation-Impervious surface-Soil (V-I-S) model. Linear Spectral Mixture Model comprises five main processes: Minimum Noise Fraction (MNF), Pixel Purity Index (PPI), end-members collection by n-D visualizer, linear spectral unmixing and accuracy test. End-members include vegetation, high albedo surface, low albedo surface and soil. By using statistical analysis, transfer matrix and grid analysis, we evaluated the pattern dynamic of vegetation coverage, and discussed the effect of urbanization, Converting Cultivated Land into Forest/Grass and climate change to vegetation changes in each Valley terrace area and hills area. The results indicate that: at overall level, the average vegetation coverage kept about 30% and showed a downtrend in the study period, meanwhile the regional differences had a little decrease. The areas of no vegetation coverage, moderate and high abundance vegetation coverage showed increasing trend, while the areas of low and full abundance vegetation coverage showed decreasing trend. The vegetation coverage in northwestern and southwestern area emerged in an increasing trend and it was mainly from low and moderate vegetation coverage. Huangzhong County is the main area affected by the policy, and finished Converting Cultivated Land into Forest/Grass and afforestation of 54.91km<sup>2</sup> and 247.98km<sup>2</sup> from 2000 to 2005. It suggested that the policy was very effective. Vegetation dynamics of hills areas may be affected by climate change because that they had same trend to the vegetation dynamics effects of climate change in Tibetan Plateau. Vegetation coverage around urban built-up area changed obviously along with urbanization direction and intensity. Areas of moderate and high abundance vegetation coverage presented a degenerate trend, especially in the urban built-up area influenced by urbanization. The main reason is that urban construction land rapid increased after 2000 and occupied moderate and high vegetation coverage. Effects of human activities on vegetation coverage may be more intense comparing to climate change because that their effect trends on vegetation are opposite. The changing trend of vegetation coverage grade can be summarized that low grades developed to high grades because of converting cultivated land into forest/grass and medium grades presented a degenerate trend because of urbanization. It is necessary to take measures to protect the vegetation around built-up area, and avoid irreversible degradation.

**Key Words:** plateau valley-city; vegetation dynamics; linear spectral mixing model; transfer matrix; Xining

青藏高原作为地球的“第三极”,是典型的生态环境敏感区<sup>[1]</sup>。其独特的地域环境使高原生态系统非常脆弱,森林覆盖率低,植被生长缓慢,一旦被毁,极易演变为荒漠、戈壁,且恢复难度大<sup>[2]</sup>。高原型河谷城市因其特殊的地形、地貌特征,城市化过程受到地形条件深刻的潜在影响,人为扰动对生态系统影响剧烈<sup>[3]</sup>。植被作为城市生态系统的子系统,响应更加敏感<sup>[4]</sup>。20世纪后期以来,随着经济发展与人口增长,不合理资源开发与盲目垦殖,使本就脆弱的高原植被遭到破坏,导致水土流失、草原退化和土地沙化等生态问题<sup>[5]</sup>。为解决上述问题,我国于21世纪初期开展了退耕还林(草)工程。深入研究城市化与退耕还林(草)工程共同作用下高原型河谷城市的

植被变化及其影响因素,对促进西部大开发及城市化健康发展,建立良好的城市人居、生态环境具有重要的现实意义。

基于遥感的植被变化研究成为全球变化研究的重要领域之一<sup>[6-7]</sup>。遥感技术作为提取陆地表面信息的手段,具有大面积同步观测、较好的时效性等特点,能够很好的提取植被信息,监测植被变化<sup>[8]</sup>。近年来研究中,国内外学者利用 NOAA-AVHRR、SPOT、SPOT-VGT、MODIS 等高时间低空间分辨率数据对大、中尺度区域进行了较长时序的植被变化研究并探讨了其与气候因子的关系<sup>[9-14]</sup>,利用 Landsat TM 与 ETM+ 等中空间低时间分辨率数据对中小尺度区域进行了植被变化研究,且侧重于植被空间格

局的变化分析<sup>[15-16]</sup>。目前植被估算的主要方法为植被指数法与混合像元法<sup>[17]</sup>。但由于城市地物光谱的高异质性、下垫面性质与大气污染等影响,采用植被指数表征城市植被所得信息量明显偏低<sup>[18]</sup>。基于 RIDD 的 V-I-S (Vegetation-Impervious surface-Soil) 模型<sup>[19]</sup>发展而来的混合像元模型不仅提高了植被提取模型的精度,并且丰富了地表植被的信息量<sup>[20]</sup>。主要包括线性模型、概率模型、几何光学模型、随机几何模型以及模糊模型等方法<sup>[21]</sup>。

根据高原城市植被变化的研究多聚焦于黄土高原河谷城市,青藏高原河谷城市植被变化研究较少的研究现状。本文选择青藏高原典型河谷城市——西宁市为研究区,采用简单、高效、物理意义明确的线性光谱混合模型提取植被覆盖<sup>[22]</sup>,并采用亚像元、像元与格网等多个尺度解析西宁城区在快速城市化及“退耕还林(草)”工程共同作用下的植被覆

盖分布及变化,有助于加深对高原河谷城市植被变化特征及影响因素的分析,同时为生态环境质量评价与保护提供更加精确的依据。

## 1 研究区概况

西宁市位于青藏高原东部边缘河湟谷地湟水上游,地理坐标东经 100°54′至 101°56′,北纬 36°13′至 37°23′,地处青藏高原与黄土高原交错地带,山峦起伏,沟壑纵横,为典型高原河谷城市。海拔在 2200—3000m 之间,平均海拔 2295m,四面环山,全市地貌以浅山丘陵和川水河谷阶地为主,受地形、海拔及水、热条件影响,形成了川水、脑山及浅山 3 个生态区域。属大陆性高原半干旱气候,以寒冷、干旱为主,年均温 6.1℃,年均降水量 400mm。独特的地貌及气候使森林植被覆盖低,植物生长缓慢。

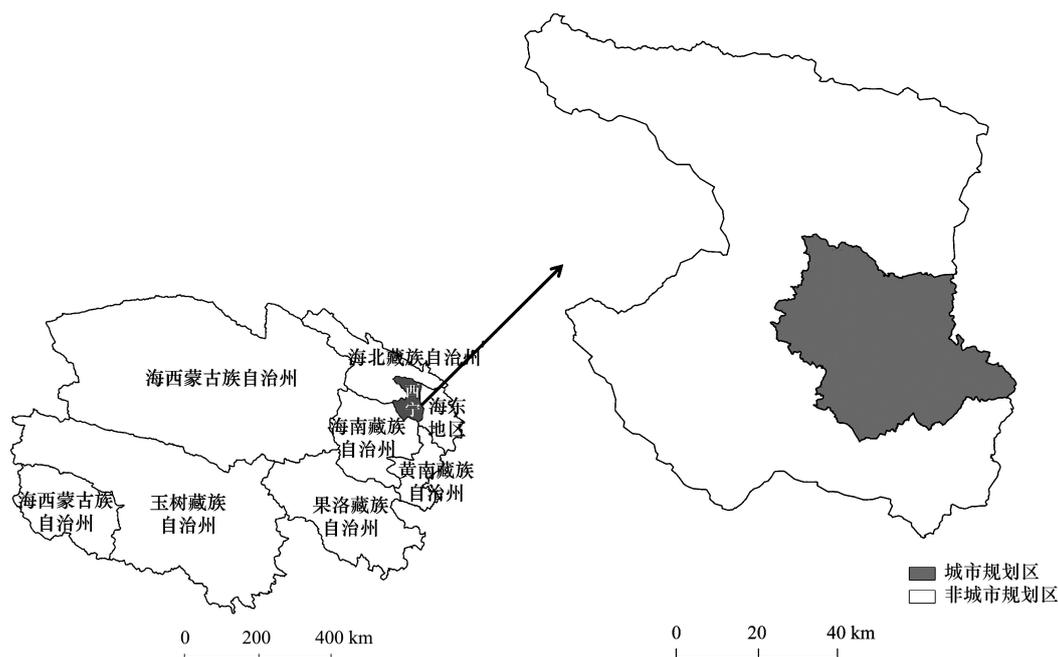


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Sketch of the study area

本文选取西宁市城市规划区为研究区(图 1),包括市区全部及大通、湟源、湟中部分地区,面积 1425.4km<sup>2</sup>。市区主要为河湟川谷地带冲积平原,西北高,东南低,川道呈“丰”字形由西北向东南延伸。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源与预处理

研究所选数据源为研究区 1995 年 6 月 11 日与

2009 年 6 月 17 日两期四景 Landsat 5 TM 遥感影像的第 1—5 和第 7 波段(影像轨道号为 132/34 与 132/35)。两期影像中植被基本处于同一物候期,其时空变化可比性较好。同时辅以西宁市市区规划图及 DEM 高程图。

首先进行辐射定标<sup>[23]</sup>,参照影像头文件信息,将 DN 值转化为辐射亮度值,消除传感器及太阳仰角造成的内部误差;其次采用 MODTRAN 4+模型进

行大气纠正,转化为地表反射率。参照西宁市城市规划区矢量文件,对两期影像分别进行镶嵌、配准处理,误差在一个像元内。最后,通过影像裁剪获得研究区影像。基础数据预处理及后续分析工作均在遥感处理软件 ENVI5.0、地理信息系统 Arc GIS10.0 平台支持下完成。

## 2.2 植被覆盖度提取

采用线性光谱混合模型(LSMM)进行混合像元分解并提取植被覆盖度。虽然混合像元内组分并非简单线性关系,但 LSMM 具有一定物理学意义,仍可高效提取地表覆盖特征<sup>[24-25]</sup>,且精度可达 90% 以上<sup>[26]</sup>。其通常定义为:像元在某一波段的光谱亮度值是由构成像元的端元(Endmember)的反射率(亮度值)以其所占像元面积比例为权重系数的线性组合<sup>[24,27]</sup>,公式如下:

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \varepsilon_{i\lambda} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 \quad (2)$$

$$RMS = \left[ \sum_{i=1}^{\lambda} (\varepsilon_{i\lambda})^2 / N \right]^{(1/2)} \quad (3)$$

式中,  $R_{i\lambda}$  为第  $\lambda$  波段第  $i$  个像元的光谱反射率;  $N$  为端元的数量,且  $N \leq m + 1$ ,  $m$  为波段数;  $f$  为对应  $i$  像元的第  $k$  个端元所占的分量值;  $C_{k\lambda}$  为第  $k$  个端元

所在  $\lambda$  波段的光谱反射值;  $\varepsilon_{i\lambda}$  为第  $\lambda$  波段第  $i$  个像元对应的误差值;  $RMS$  为均方根误差(  $RMS$  越小,模型总体误差越小)。

### 2.2.1 纯净像元获取

端元获取是混合像元分解的关键,其类型、数量及光谱值均影响 LSMM 分解精度。数量少会纳入非典型端元产生分量误差,多则会使模型对噪音、污染物等敏感性增强而影响分类精度<sup>[28-29]</sup>。根据西宁土地覆被特点,参考 V-I-S 模型,本文确定端元类型为土壤、植被、高反照地物、低反照地物四类。

通过最小噪声分离( Minimum Noise Fraction, MNF)变换去相关分离数据噪声,减少后续计算量。同时判定数据内在维度(波段数)<sup>[30]</sup>。两期影像经 MNF 变换生成的 6 个波段分量中,前 4 个信息含量很高,因此选取前 4 个分量进行纯净像元指数(Pixel Purity Index, PPI)处理,提取纯净像元,并将 PPI 值大于 20 的区域输出为感兴趣区( Region of Interest, ROI),作为端元收集范围。

### 2.2.2 端元收集

将 MNF 前 3 个分量及输出的 ROI 输入 N-维可视化工具,在三维旋转过程中选取不同集群拐点与边缘作为端元,同时交互式参考像元光谱曲线(图 2),筛选出土壤、植被、高反照及低反照四种端元。

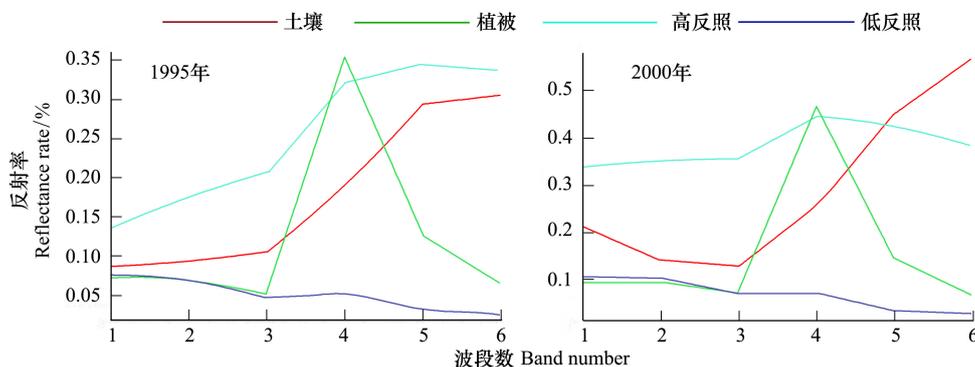


图2 端元波谱特征

Fig.2 Spectral profile of end-members

### 2.2.3 LSMM 分解与结果检验

采用收集到的端元波谱特征,通过带约束条件的最小二乘法进行 LSMM 分解,得到研究区植被覆盖度(VEGFR)(图 3)。采用光谱分解均方根误差进行结果检验。根据 LSMM 分解所得均方根  $RMS$  图像可得平均误差为 0.003 与 0.004,均小于误差要求 0.02<sup>[31]</sup>。且  $RMS$  高于 0.1 的像元数小于 10,满足精

度要求。

## 2.3 植被整体变化及转移矩阵

为进一步分析植被覆盖的变化特征,在得到的植被覆盖度基础上,对其进行分级处理。考虑西宁当地气候条件与植被特征,参考李晓琴等提出的五级分类方法<sup>[32]</sup>,据植被丰度指标,将研究区内植被丰度分为五级(表 1)。

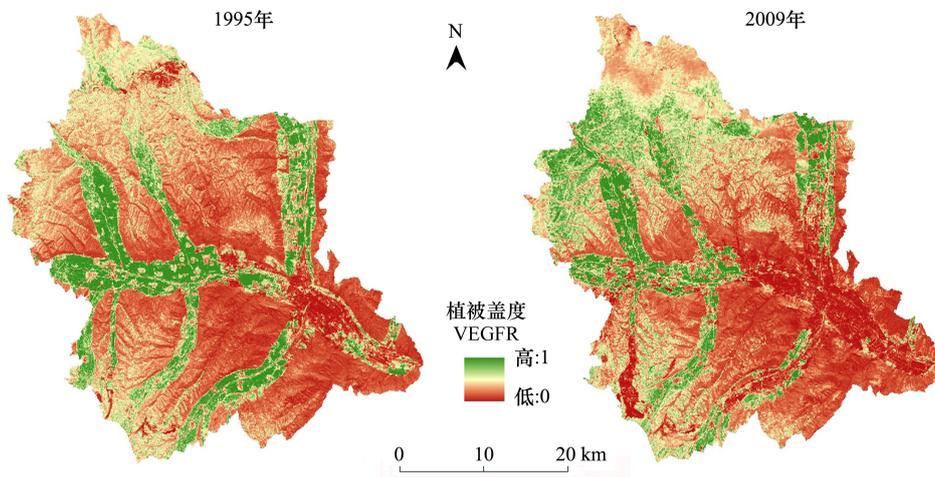


图3 植被覆盖度分布图

Fig.3 Fraction image of vegetation cover

表1 植被覆盖分级标准

Table 1 Threshold of different vegetation coverage grades

植被覆盖等级 Vegetation coverage grades	基本无覆盖 No vegetation coverage	低覆盖 Low vegetation coverage	中覆盖 Moderate vegetation coverage	高覆盖 High vegetation coverage	全覆盖 Full vegetation coverage
等级编码 Numbers(A)	1	2	3	4	5
阈值 Threshold/%	$0 \leq Fg < 10$	$10 \leq Fg < 30$	$30 \leq Fg < 60$	$60 \leq Fg < 90$	$90 \leq Fg$

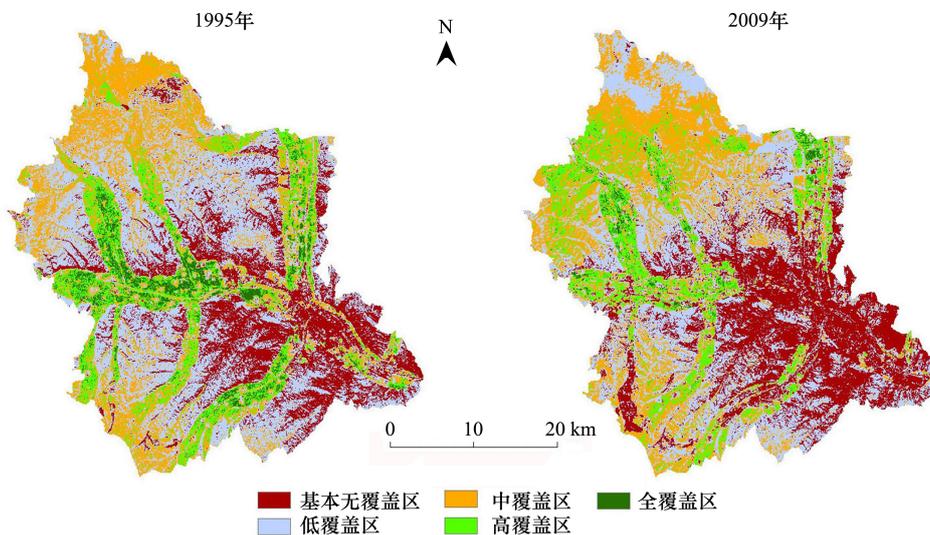


图4 研究区植被覆盖分级图

Fig.4 The diagram of different vegetation coverage grades

得到研究区植被覆盖等级的空间分布(图4), 进而通过转移矩阵利用等级编号(表1)计算1995与2009年植被覆盖等级的变化趋势。其公式为<sup>[33]</sup>:

$$C_{i \times j} = A_{ki \times j} \times 10 + A_{(k+1)i \times j} \quad (4)$$

式中,  $i$ 、 $j$  分别为栅格图像行列编号,  $C_{i \times j}$  为由  $k$  时期到  $k+1$  时期第  $i$  行  $j$  列像元的植被覆盖等级变化,

$A_{ki \times j}$  为前一期植被覆盖等级编码,  $A_{(k+1)i \times j}$  为后一期植被覆盖等级编码。

#### 2.4 植被变化类型及网格分析

在转移矩阵及植被覆盖等级空间分布的基础上, 划分植被变化类型。植被覆盖等级上升定义为植被好转类型, 植被覆盖等级不变定义为植被保持

类型,植被覆盖等级下降则定义为植被退化类型(公式 5)。

$$TC_{ixj} = A_{(k+1)ixj} - A_{kixj} \quad (5)$$

式中,  $TC_{ixj}$  为由  $k$  时期到  $k+1$  时期的植被覆盖等级变化类型,  $A_{(k+1)ixj}$  为前一期的植被覆盖等级编码,  $A_{kixj}$  为后一期植被覆盖等级编码(表 1)。如  $TC_{ixj} > 0$ , 定义为植被好转类型, 如  $TC_{ixj} < 0$ , 定义为植被退化型, 如  $TC_{ixj} = 0$ , 定义为植被保持型。

为凸显研究区内的主要变化类型, 识别整体植被演变的主要信息及区域, 基于 30 m 空间分辨率的植被类型分布, 本文采用格网分析法进行尺度上推描述植被变化类型的空间分布<sup>[34]</sup>。根据研究区面积及信息量综合考虑, 采用 600m × 600m 格网, 根据格网内植被演变类型权重定义格网内植被演变类型

属性, 格网内植被演变类型权重大于 50% 则定义该类型为格网转变类型。以此得到植被演变类型的主要空间分布(图 6)。

### 3 植被时空变化结果分析

#### 3.1 数量结构变化

研究期内, 研究区平均植被覆盖度维持在 30% 左右, 覆盖率较低。1995—2009 年平均植被覆盖度  $\bar{F}_g$  降低 2.73%。研究区植被覆盖度标准差(STD)降低 1.97%。说明研究期内植被覆盖空间差异变化不大, 略有减小(表 2)。在数量上, 基本无覆盖、中覆盖、高覆盖等级呈增加趋势, 低覆盖、全覆盖呈下降趋势。

表 2 研究区平均植被覆盖度及不同等级组成面积统计(1995—2009)

Table 2 Statistics of vegetation coverage and the area of different vegetation coverage grades

年份 Year	植被覆盖度 VEGFR/%		不同植被覆盖度等级面积 Area of different vegetation coverage/km <sup>2</sup>				
	$\bar{F}_g$	STD	基本无覆盖	低覆盖	中覆盖	高覆盖	全覆盖
1995	31.62	25.70	283.3416	570.8259	343.0377	167.4585	60.7392
2009	28.89	23.73	361.4391	508.2885	366.867	170.5275	18.2808
变化值 Change	-2.73	-1.97	78.0975	-62.5374	23.8293	3.069	-42.4584

#### 3.2 植被覆盖等级转移矩阵

植被覆盖等级转移矩阵显示, 基本无覆盖等级集中在东南部川道城市建成区及其周边丘陵过渡地带, 其中 68.345% 维持原状, 变化则主要向低覆盖等级组分转变, 转变区域主要位于北部川道与丘陵山区过渡边缘(图 5, A)。而转变为基本无覆盖等级的来源以低覆盖、高覆盖及全覆盖等级为主, 综合作用导致基本无覆盖等级增加 78.0975km<sup>2</sup>。低覆盖等级 53.012% 维持不变, 其余主要向无、中覆盖等级转变, 向无覆盖转变区域主要位于东南部城市建成区及其周边过渡带, 而向中覆盖转变的主要区域为西北部及西南部丘陵山区(图 5, B), 转变为低覆盖等级的

来源主要是基本无覆盖、中覆盖及高覆盖等级, 综合作用导致低覆盖等级减少 62.5374km<sup>2</sup>。中覆盖等级组分除 47.974% 维持不变外, 其余部分主要向低、高覆盖等级组分转变。向高覆盖转变区域位于西北部区域, 向低覆盖转变区域则分散于川道内(图 5, C), 转变为中覆盖等级的主要来源为低覆盖和高覆盖, 综合作用导致中覆盖等级增加 23.8293km<sup>2</sup>。高覆盖等级主要向无、低、中覆盖等级转变, 高覆盖向无覆盖转变主要区域为城市中心区周边及南部川道内, 向低、中覆盖等级转换的主要区域为西部及北部川道内(图 5, D), 转变为高覆盖的来源主要是中覆盖及全覆盖等级, 综合作用下高覆盖等级增加

表 3 1995—2009 年不同植被覆盖等级组分面积比转移矩阵

Table 3 The transition matrix of different vegetation coverage grade area from 1995 to 2009

植被覆盖等级转化 Transition rate/%	2009				
	无覆盖	低覆盖	中覆盖	高覆盖	全覆盖
1995					
无覆盖	68.345	29.127	2.404	0.123	0.001
低覆盖	18.370	53.012	24.834	3.722	0.062
中覆盖	8.719	26.509	47.974	16.055	0.742
高覆盖	13.349	14.706	26.493	39.822	5.631
全覆盖	17.557	12.504	15.410	44.740	9.788

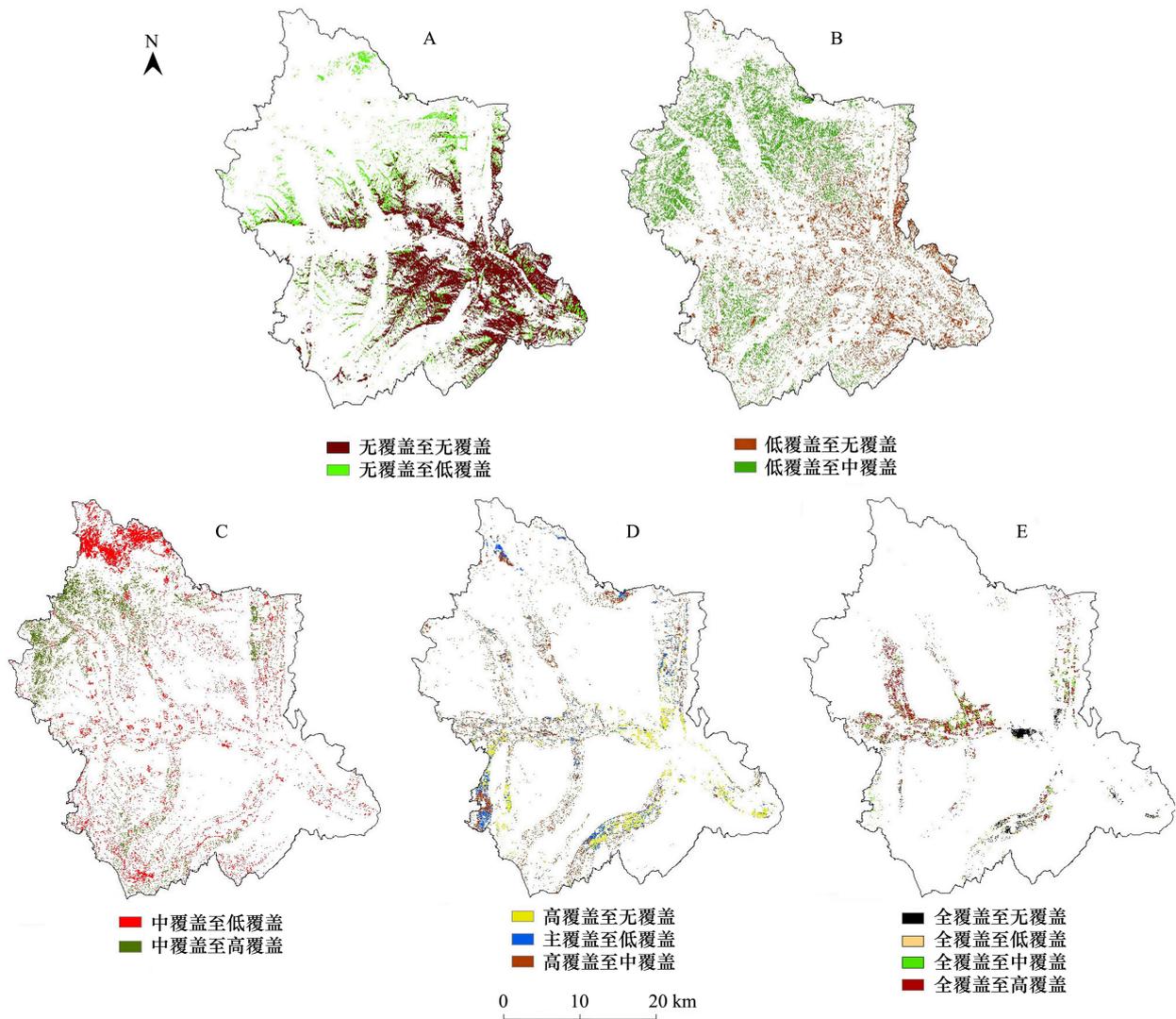


图 5 植被等级空间动态分布图

Fig.5 Distribution of vegetation coverage grade dynamic

3.069 km<sup>2</sup>。全覆盖等级仅 9.788% 未发生变化,大部分向高覆盖等级组分转变,少量向无、低、中覆盖等级转变。且转变区域主要集中于西部、北部及东南部川道内(图 5,E),但转变为全覆盖的来源很少,只有高覆盖少量转变为全覆盖,综合作用下全覆盖面积下降 42.4584km<sup>2</sup>。

### 3.3 植被变化类型空间分布

综合上述各等级变化趋势,定义植被覆盖等级上升为植被好转类型,不变为植被保持类型,下降则为植被退化类型。并依据格网分析进行尺度上推以提取各等级变化信息,得到研究区植被演变类型分布(图 6)。可见研究区西北部丘陵区植被覆盖整体趋于好转,主要由基本无覆盖至低覆盖、低覆盖至中覆盖及中覆盖至高覆盖转化而来。主要原因为西

市自 2003 年开始大力实施退耕还林(草)工程,如图 6 所示,实施效果明显。川道内除较早城市核心区植被覆盖未发生变化外,其他区域植被覆盖整体下降明显。主要由低覆盖至无覆盖、中覆盖至低覆盖、高覆盖至中、低、无覆盖及全覆盖至高覆盖转化而来。其中东南部川道内植被覆盖丰度下降的主要原因是由于城市快速扩张导致的城市周边中、低覆盖等级组分不断被侵蚀,而中西部川道内主要中高植被覆盖组分为农业植被覆盖,可见研究期内中西部川道内农业植被覆盖下降也较为明显。

## 4 植被变化影响因素分析与讨论

### 4.1 川道内城市拓展对植被变化的影响

河谷型城市空间发展具有典型特征,大体经历

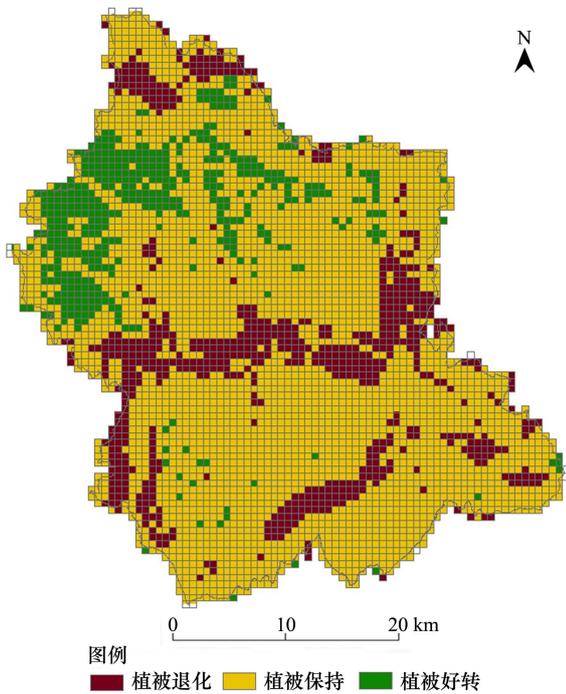


图 6 植被演变类型分布图

Fig.6 Distribution of vegetation coverage grade dynamic type

“集中块状—放射性突变发展—分散组团—带型城市”4 个阶段。由于河谷两侧山体的限制,在空间形态上不同于平原城市,往往具有不变性特征。西宁市川道内城市扩展、耕地、绿地覆盖的变化共同影响了植被覆盖度的空间分布特征。

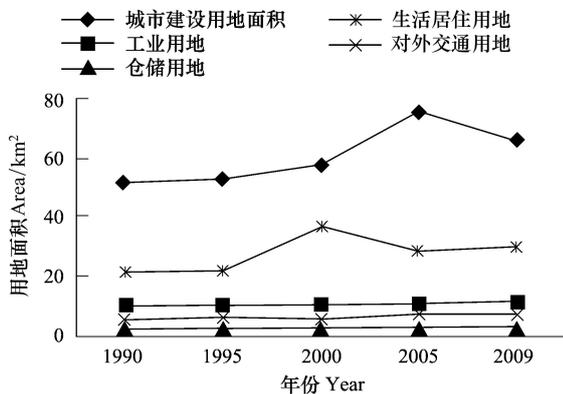


图 7 西宁市 1990—2009 年城市建设用地面积

Fig.7 Xining urban construction land area of 1990—2009

西宁城市空间扩展经历了集中块状期—突变放射生长期—分散组团期 3 个阶段,正在向带状都市区方向发展。1990 年至 2000 年间为“横向填充”阶段,城市内部功能区调整和完善,根据统计资料<sup>[35]</sup>,1990 年城市建设用地面积 51.52km<sup>2</sup>,1995 年为 52.7 km<sup>2</sup>,2000 年为 57.17 km<sup>2</sup>,1990—1995 年增长率为

2.29%,1995—2000 年增长率为 8.48%,城市建设用地面积增加平缓。但 2000—2005 年城市建设用地面积增幅达 31.19%,2005—2009 虽然下降 12.57%,但总体上 2000—2009 城市建设用地增幅较大。原因在于进入 21 世纪后,随着西部大开发战略的实施及新一轮城市总体规划的实施,西宁市快速发展,进入“分散组团期”,城市中心地区工业用地置换,城市空间结构拉开,内部趋于整合,城市向分散组团方向发展,导致城市用地规模迅速增大(图 7),对川道内植被覆盖造成了不可逆转的破坏。

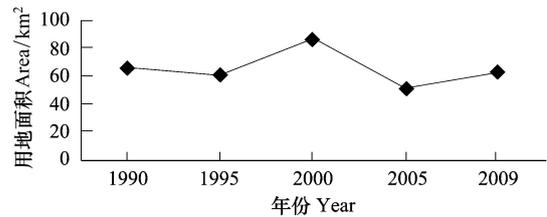


图 8 市区 1990—2009 耕地面积

Fig.8 Urban arable land area of 1990—2009

同时,川道内城市周围多为中高丰度农业植被覆盖,城市扩展必然侵占耕地,2000 至 2005 年西宁市市区耕地面积持续下降,2005—2009 年则呈小幅上升趋势(图 8),说明建设用地扩展对耕地面积影响明显,且与图 7 城市建设用地面积变化趋势吻合,互相佐证。综合表明城市化导致川道内城市周边大量中高覆盖等级植被转变为基本无覆盖等级,造成植被退化(表 3,图 5,图 6)。

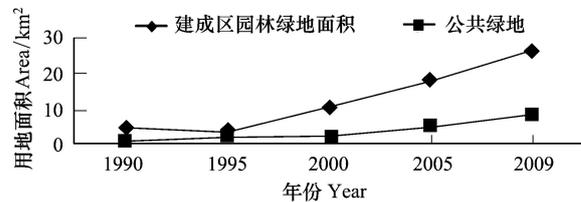


图 9 1990—2009 年建成区园林绿地

Fig.9 Public green area of built-up of 1990—2009

由于受区域自然环境的限制,西宁市建成区园林绿地面积较少,绿地不成系统。建成区园林绿地面积总体上呈先降后升趋势(图 9)。1990—1995 年小幅下降 1.35km<sup>2</sup>,1995—2009 则累计增长 23.23km<sup>2</sup>,公共绿地整体上呈稳定的增加趋势。显然,城市内部人工园林绿地伴随城市化发展配套建设。但相比城市扩展侵占城市周边耕地的变化量 56.97 km<sup>2</sup>,建成区绿地面积相对较少,增加的园林绿

地对缓解城市化引起的植被退化有一定作用,但不能阻止川道内植被退化趋势。

#### 4.2 丘陵退耕还林(草)及造林对植被变化的影响

西宁自 2000—2005 年,大力推进退耕还林(草)工程。川道平均高程为 2300m 左右,丘陵区域平均高程为 2600m 左右,根据上文区域统计得到植被好转类型区域的平均高程为 2596m,平均坡度为 14°,可知植被好转类型主要位于丘陵地带。根据统计资料<sup>[35]</sup>,全市退耕还林(草)区域主要位于大通、湟中、湟源三县。其中,湟中县是青海省实施退耕还林(草)的重点县之一,且本文西北部丘陵区主要位于湟中县,因此湟中县退耕还林(草)及造林数据可有效表示该政策对研究区丘陵植被覆盖变化的影响。

湟中县退耕还林(草)及造林面积变化趋势与全市变化基本吻合,同样在 2002 年达到峰值后下降(图 10)。截止 2005 年累计退耕还林(草) 54.91km<sup>2</sup>,累计造林 247.98km<sup>2</sup>。可见,退耕还林(草)及造林明显提高了丘陵区植被覆盖等级,有效的促进了植被好转。

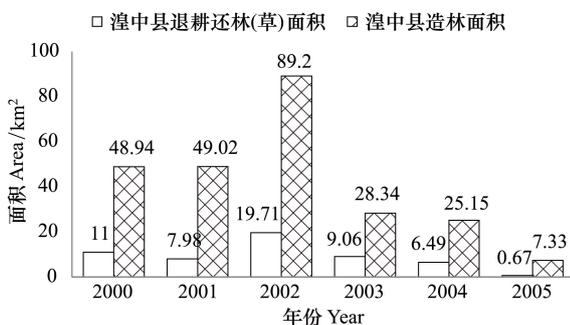


图 10 2000—2005 年湟中县退耕还林(草)及造林面积

Fig.10 Area of Converting cultivated land into forest/grass and afforestation of 2000—2009 in Huangzhong County

#### 4.3 气候变化对植被的影响

植被覆盖的变化是气候变化与人类活动的综合产物<sup>[36]</sup>。上文中已对人类活动对植被的影响进行了详细讨论,同时,气候变化对植被的影响也不可忽略。在全球变暖的背景下,青藏高原在研究期内的总体特征是气温呈上升趋势,降水量呈增加趋势,最大可能蒸散量呈下降趋势,大多数地区的干湿状况为由于向湿发展的趋势<sup>[37]</sup>。西宁地区的气候变化与青藏高原整体变化吻合,表现出向暖湿方向变化的趋势。气温呈上升趋势,气候倾向率为 0.34℃/10a,特别在 20 世纪 90 年代后增温明显;降水量呈

增加趋势,气候倾向率为 25.24mm/10a<sup>[38]</sup>。由于青藏高原为气候变化敏感区及生态脆弱带,因此西宁气候的变化趋势对其植被变化有较为明显的影响,导致其植被生长季提前及生长季生长加速<sup>[39]</sup>,在一定程度上提高了西宁植被覆盖。同时,影像获取日期正处于西宁春末夏初,研究表明在研究期内该地区春季及夏季不同类型植被的 NDVI 均呈显著增加趋势<sup>[39]</sup>。与研究区内川道及丘陵区植被覆盖趋势相比较,可知丘陵区植被变化与气候影响趋势相同,川道内城市区域变化则与气候影响趋势相反。由此可知,丘陵区域在退耕还林(草)、造林及气候的共同作用下表现出植被好转,川道区域在城市化及气候的共同影响下表现出植被退化,可见,本文研究结果低估了城市化对川道内植被变化的影响幅度,相比气候影响,人为活动的影响更加强烈。

## 5 结论

本文针对典型高原河谷城市西宁,以 TM 影像为数据源,基于 V-I-S 模型及线性光谱混合模型提取研究区植被覆盖度,并采用整体分析、转移矩阵及格网分析探究了西宁市城市规划区植被覆盖在亚像元、像元与格网尺度上的变化特征,并分别探讨了城市化对川道内植被的负向影响因素、退耕还林对丘陵区植被的正向影响因素及气候变化对植被覆盖变化的影响。主要结论包括:研究期内,西宁市城市规划区平均植被覆盖度维持在 30% 左右。2009 年与 1995 年相比植被覆盖度出现下降,植被覆盖空间差异略有减小。在数量上,基本无覆盖、中覆盖、高覆盖等级呈增加趋势,低覆盖、全覆盖呈下降趋势。

研究区西北部及西南部丘陵区植被覆盖整体趋于好转,主要由中低丰度植被等级变化而来,2000—2005 年湟中县累计退耕还林(草) 54.91km<sup>2</sup>,累计造林 247.98km<sup>2</sup>。综合作用下使研究区西北部植被覆盖等级提高,表明西宁市退耕还林(草)工程对于改善植被覆盖效果明显,同时丘陵区植被变化与气候影响趋势相同,表明其植被变化可能也受气候变化影响。城市扩展方向及强度对其周边植被覆盖的影响表现突出。市区快速扩张及农业退化使川道内中高丰度植被覆盖整体退化趋势明显,主要由低覆盖至无覆盖、中覆盖至低覆盖、高覆盖至中、低、无覆盖及全覆盖至高覆盖转化而来。主要原因在于 2000

年后西宁进入快速发展期,城市用地规模迅速增大,川道内城市周边大量中高覆盖等级植被转变为基本无覆盖等级,造成植被退化,同时较低的城市园林绿地覆盖及人口增长加剧了川道内的植被退化。川道内植被退化趋势与气候影响下的区域植被好转趋势相反,相比气候影响,人为活动的影响更加强烈。

概括来说,研究区植被覆盖等级的变化趋势为植被覆盖较差的等级(基本无覆盖和低覆盖)向高一等级别发展,得益于退耕还林(草)工程;中等级别以上的覆盖等级出现一定程度的退化,尤其是位于川道中受到城市化干扰的区域植被退化问题尤为突出,需对这些区域采取植被保育措施,避免植被覆盖高等级区域受到城市化影响造成不可逆转的退化。

采用线性光谱混合模型评价城市植被动态具有优秀的表现,本文采用两期时点数据评估了西宁市近 15 年间的植被覆盖动态变化,为更加全面、科学的评价城市植被动态,下一步研究中可针对多时序数据进行城市植被动态及其驱动机制研究。

**致谢:** 中山大学地理科学与规划学院刘珍环博士给予帮助,特此致谢。

#### References:

- [ 1 ] Xu J, Zhang B P, Tan J, Sun R H, Yao Y H. Spatial relationship between altitudinal vegetation belts and climatic factors in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27 (6): 663-670.
- [ 2 ] Ma Y Y. Ecological city: Tibetan Plateau urban development goals in the 21st century. *Journal of Peking University (Philosophy and Social Sciences)*, 2004, (S1): 88-92.
- [ 3 ] Yang Y C. Research on the Valley-city of China. *Areal Research and Development*, 1999, 18(3): 61-65.
- [ 4 ] Hu S J, Hu D Y, Zhao W J. Extract urban vegetation coverage based on LSMM and improved FCM: a case study in Haidian District. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1018-1024.
- [ 5 ] Ma J L, Ma H. On the work of "stopping cultivation to return to forestry and grassland" of Xining City. *Journal of Qinghai Environment*, 2002, 12(3): 106-108.
- [ 6 ] Mark R, Rick C, Mick C, Steve P, Dave T. Long-Term Studies of Vegetation Dynamics. *Science*, 293(5530): 650-655.
- [ 7 ] Jia B Q. Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1654-1666.
- [ 8 ] Zou P, Wang Y P, Wang Z S, Fan F L. Accessing the linear spectral un-mixing approach for extracting vegetation information using landsat ETM+ data in Macao. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2007, (2): 131-136.
- [ 9 ] Neigh C S R, Tucker C J, ownshend J R G T. North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1749-1772.
- [ 10 ] Martínez B, Gilabert M A. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 1823-1842.
- [ 11 ] Li Y C, Gong P, Liu C X, Chen J, Yu D Y. Vegetation cover changes and correlation with climatic factors in Northern China during 1982—1999. *Resources Science*, 2006, 28(2): 109-117.
- [ 12 ] Sun H Y, Wang C Y, Niu Z, Bukhosor, Li B. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 204-210.
- [ 13 ] Qiu H M, Cao M M. Spatial and temporal variations in vegetation cover in China based on SPOT vegetation data. *Resources Science*, 2011, 33(2): 335-340.
- [ 14 ] Song F Q, Xing K X, Liu Y, Liu Z C, Kang M Y. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shanxi based on MODIS/NDVI. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 354-363.
- [ 15 ] Han G F, Xu J H. Vegetation change trajectory and the reasons in Shanghai City. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1793-1803.
- [ 16 ] Mo H W, Ren Z Y. Images analysis of the vegetation coverage changes in Yuyang District of Northern Shaanxi Province in the recent 30 years. *Resources Science*, 2009, 31(8): 1409-1414.
- [ 17 ] Chen Y H, Li X B, Shi P J. Landscape spatial-temporal pattern analysis on change in the fraction of green vegetation based on remotely sensed data: A case study in Haidian District, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1581-1586.
- [ 18 ] Yue W Z. Study on urban landscape pattern and its thermal environment effect based on remote sensing image. Beijing: Science Press, 2008, 76-77.
- [ 19 ] Ridd M K. Exploring a V-I-S(vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [ 20 ] Wang Z Y, Xu J H, Lü G H, Zhang Z H, Hu Q. Patterns of urban green spaces based on linear spectral mixture model: an empirical study in Urumqi. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2008, (6): 40-50, 74-74.
- [ 21 ] Ichoku C, Karnieli A. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation. *Remote Sensing of Reviews*, 1996, 13(34): 161-186.
- [ 22 ] Li E S, Zhang B M, Song L H, Yu W J, Tang D J. A review on spectral unmixing algorithms based on linear mixing model. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(5): 42-44.
- [ 23 ] The user's guide of Landsat Science Data [EB/OL]. [2012-4-27]. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html>.
- [ 24 ] Zhao Y S. Principles and Methods of Analysis of Remote Sensing Applications. Beijing: Science Press, 2003: 330-331.
- [ 25 ] Cui T X, Gong Z N, Zhao W J, Zhao Y L, Lin C. Research on estimating wetland vegetation abundance based on spectral mixture analysis with different endmember model: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1160-1171.
- [ 26 ] Wu C S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM + imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(4): 480-492.
- [ 27 ] Liu Z H, Wang Y L, Peng J, Xie M M, Li Y. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961-971.

- [28] Xie M M, Wang Y L, Li G C. Spatial variation of impervious surface area and vegetation cover based on SubPixel Model in Shenzhen. *Resources Science*, 2009, 31(2): 257-264.
- [29] Liu Y, Yue W Z. Estimation of urban vegetation fraction by image fusion and spectral unmixing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 93-99.
- [30] Li H, Chen J F, Yu M. Extracting vegetation coverage information from ASTER remote sensing data based on linear spectral immixture model. *Geo-Information Science*, 2005, 7(1): 103-106, 115-115.
- [31] Wu C S, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493-505.
- [32] Li X Q, Sun D F, Zhang F R. Landscape pattern analysis on change in the fraction of green vegetation based on remotely sensed data in Beijing Mountainous Area. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(3): 272-280.
- [33] Shi P J. *Methods and practice of land use/cover change research*. Beijing: Science Press, 2000: 106-109.
- [34] Yao Y H, Zhang B P, Luo Y, Zhu J, Cen G. The application of grid computing method to the research of spatial pattern — an analysis of karst landscape pattern in Guizhou. *Geo-Information Science*, 2006, 8(1): 73-78.
- [35] Xining Bureau of Statistics. *Xining Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 1986-2009.
- [36] Li Y F, Liu G H. Characteristics of vegetation cover changes in Lantsang Basin based on MODIS vegetation index products (MOD13). *Resources Science*, 2012, 34(7): 1214-1221.
- [37] Wu S H, Yin Y H, Zheng D, Yang Q Y. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 3-11.
- [38] Pang L Y. Research on climate change of Xining in recent 40 years. *Qinghai Meteorology*, 2004, 2: 24-27, 33-33.
- [39] Yan Y H, Pu S L. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 1-8.
- [12] 孙红雨, 王常耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [13] 邱海军, 曹明明. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国植被覆盖时空变化分析. *资源科学*, 2011, 33(2): 335-340.
- [14] 宋富强, 刑开雄, 刘阳, 刘志超, 康慕谊. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.
- [15] 韩贵峰, 徐建华. 上海城市植被变化轨迹及其成因分析. *生态学报*, 2009, 29(4): 1793-1803.
- [16] 莫宏伟, 任志远. 陕北榆阳区 1978 年至 2005 年植被覆盖率变化分析. *资源科学*, 2009, 31(8): 1409-1414.
- [17] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 基于遥感的植被覆盖变化景观分析——以北京海淀区为例. *生态学报*, 2002, 22(10): 1581-1586.
- [18] 岳文泽. 基于遥感影像的城市景观格局及其热环境效应研究. 北京: 科学出版社, 2008: 76-77.
- [20] 王占永, 徐建华, 吕光辉, 张治华, 胡青. 运用线性光谱混合模型解析城市绿色空间格局: 乌鲁木齐市的实证研究. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2008, (6): 40-50, 74-74.
- [22] 李二森, 张保明, 宋丽华, 余文杰, 唐德瑾. 线性混合模型的光谱解混算法综述. *测绘科学*, 2011, 36(5): 42-44.
- [24] 赵英时. *遥感应用分析原理与方法*. 北京: 科学出版社, 2003: 330-331.
- [25] 崔天翔, 宫兆宁, 赵文吉, 赵雅莉, 林川. 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例. *生态学报*, 2013, 33(4): 1160-1171.
- [27] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 谢苗苗, 李猷. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征——以深圳市为例. *地理学报*, 2011, 66(7): 961-971.
- [28] 谢苗苗, 王仰麟, 李贵才. 基于亚像元分解的不透水表面与植被覆盖空间异质测度——以深圳市为例. *资源科学*, 2009, 31(2): 257-264.
- [29] 刘勇, 岳文泽. 基于图像融合与混合像元分解的城市植被盖度提取. *生态学报*, 2010, 30(1): 93-99.
- [30] 李慧, 陈建飞, 余明. 线性光谱混合模型的 ASTER 影像植被应用分析. *地球信息科学*, 2005, 7(1): 103-106, 115-115.
- [32] 李晓琴, 孙丹峰, 张凤荣. 基于遥感的北京山区植被覆盖景观格局动态分析. *山地学报*, 2003, 21(3): 272-280.
- [33] 史培军. *土地利用/覆盖变化研究的方法与实践*. 北京: 科学出版社, 2000: 106-109.
- [34] 姚永慧, 张百平, 罗扬, 朱军, 岑纲. 格网计算法在空间格局分析中的应用——以贵州景观空间格局分析为例. *地球信息科学*, 2006, 8(1): 73-78.
- [35] 西宁市统计局. *西宁市统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 1990-2009.
- [36] 李亚飞, 刘高焕. 澜沧江流域植被覆盖变化特征及其与气候因子的关系. *资源科学*, 2012, 34(7): 1214-1221.
- [37] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 杨勤业. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, 60(1): 3-11.
- [38] 庞立英. 近 40 年来西宁地区的气候变化研究. *青海气象*, 2004, (2): 24-27, 33-33.
- [39] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.

#### 参考文献:

- [1] 许娟, 张百平, 谭靖, 孙然好, 姚永慧. 青藏高原植被垂直带与气候因子的空间关系. *山地学报*, 2009, 27(6): 663-670.
- [2] 马玉英. 生态城市: 21 世纪青藏高原城市发展的目标. *北京大学学报: 哲学社会科学版*, 2004, (S1): 88-92.
- [3] 杨永春. 中国河谷型城市研究. *地域研究与开发*, 1999, 18(3): 61-65.
- [4] 胡妹靖, 胡德勇, 赵文吉. 基于 LSMM 和改进的 FCM 提取城市植被覆盖度——以北京市海淀区为例. *生态学报*, 2010, 30(4): 1018-1024.
- [5] 马建龙, 马宏. 西宁市退耕还林(草)工作刍议. *青海环境*, 2002, 12(3): 106-108.
- [7] 贾宝全. 基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析. *生态学报*, 2013, 33(5): 1654-1666.
- [8] 邹蒲, 王云鹏, 王志石, 樊风雷. 基于 ETM+图像的混合像元线性分解方法在澳门植被信息提取中的应用及效果评价. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2007, (2): 131-136.
- [11] 李月臣, 宫鹏, 刘春霞, 陈晋, 于德永. 北方 13 省 1982—1999 年植被变化及其与气候因子的关系. *资源科学*, 2006, 28(2): 109-117.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Advance in the study on drought index ..... LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops .....  
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem .....  
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web .....  
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China .....  
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining .....  
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the  
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ..... ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill  
sludge ..... CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

**Autecology & Fundamentals**

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi .....  
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* ..... XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil .....  
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy .....  
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice .....  
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress .....  
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices .....  
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses ..... LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...  
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents .....  
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant  
plants and soil in alpine meadow ..... LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)

Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses ..... XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

### Population, Community and Ecosystem

The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ..... ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)

Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ..... ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)

The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ..... ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)

Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland ..... LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)

Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China ..... LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

### Landscape, Regional and Global Ecology

The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation ..... GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)

Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years ..... MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)

Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought ..... LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)

Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 ..... DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

### Resource and Industrial Ecology

The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ..... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 象伟宁 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 34 卷 第 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 34 No. 5 (March, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松  
主 管 中国科学技术协会  
主 办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂  
发 行 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局  
国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号  
许 可 证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元