应用 MODIS 数据监测千岛湖流域植被覆盖动态(2001—2013 年)*

汤旭光^{1,2}, 李恒鹏^{1**}, 聂小飞¹, 李鹏程¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(2: 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘 要: 流域植被覆盖状况对于水源地生态环境保护具有重要的指示作用. 当前的水质目标管理不仅要着眼于湖水水质参数控制, 更应该从整个流域的角度维系生态平衡. 在此背景下, 依托长时间序列 MODIS 遥感数据对千岛湖流域 2001—2013 年植被覆盖状况进行监测, 采用最小二乘法趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验方法分析了千岛湖流域植被的空间分布特征、时间变化特征与长期变化趋势. 研究表明该方法能够有效地监测流域植被覆盖的时空动态变化: 1) 从空间分布上来看, 千岛湖流域植被覆盖状况整体较好, 但同时也发现受人为干扰较大的地域如河、湖附近的城镇建设用地、农业用地以及园地, 其 NDVI 值明显低于自然林地; 2) 从时间变化特征上看, 2001—2013 年千岛湖流域植被年际 NDVI 在 0.69~0.73 之间波动, 且近年来有增长趋势, 年内季节性 NDVI 动态分析表明高时间分辨率的 MODIS 数据能够用来区分常绿植被与落叶植被的物候特征, 以分析不同植被类型对流域氮、磷流失的风险差异; 3) 从变化趋势上看, 2001—2013 年植被覆盖状况改善的区域远大于退化的区域, 其中改善区域约占流域面积的 55.90%, 呈现出一定退化状态的区域约占 29.60% (严重退化区域仅占 3.97%), 而相对稳定不变区域约占 14.51%. 经与气温与降水等气候因子进行相关性分析表明, 植被 NDVI 与气温呈显著正相关, 而降水则不敏感, 说明气温是研究区植被生长的主导气候因子. 同时发现, 人类活动对局部植被变化影响较大. 研究结果可为流域水资源与生态环境保护提供空间数据支撑.

关键词: 千岛湖流域; 植被动态; 时空变化; 趋势分析

Vegetation dynamical status in the Lake Qiandao drainage basin using time-series MODIS data (2001 – 2013)

TANG Xuguang^{1,2}, LI Hengpeng¹, NIE Xiaofei¹ & LI Pengcheng¹

(1: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research (Jiangxi Normal University), Ministry of Education, Nanchang 330022, P. R. China)

Abstract: The status of vegetation coverage in the drainage basin is an important indicator to eco-environmental conservation of the drinking water source reservoirs. Current water quality target management should not only focus on monitoring water quality parameters in the lake, but also maintain the ecological balance of the whole drainage basin. With this background, long-term MODIS time series were used to analyze the vegetation dynamical status during 2001 – 2013 for the Lake Qiandao drainage basin. The NDVI was used as a proxy of vegetation cover, and the least squares regression trend analysis with the Mann-Kendall test were used to analyze the characteristics of distribution, time variations and spatial trends of the vegetations. The study showed that it's an effective way to reflect the spatial-temporal patterns of vegetation coverage for the Lake Qiandao drainage basin. The basic conclusions from the study are as follows: 1) From the spatial distribution of the annual mean NDVI in the study area, the vegetation coverage performs well as a whole. However, the NDVI values at the locations disturbed by intensive human activities, such as urban construction land, agricultural land and garden plots sited near the river and lake, are obviously lower than those at natural woodland.

* 国家自然科学基金项目(41271500, 41401221)、中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-10-04)和鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)开放基金项目(PK2013001)联合资助. 2014-05-19 收稿; 2014-09-05 收修改稿. 汤旭光(1986~), 男, 助理研究员; E-mail: xgtang@niglas.ac.cn.

** 通信作者; E-mail: hpli@niglas.ac.cn.

2) Based upon the time series of annual mean NDVI in the vegetation area in the basin, the NDVI values fluctuate between 0.69 and 0.73 from 2001 to 2013, and have increased since 2008, indicating seasonal changes of phenological characteristics of evergreen from that of deciduous vegetation. This can be used to analyze the risk of nitrogen and phosphorus loss of different vegetation types. 3) From the spatial trends of NDVI, the area where the NDVI values increased is much larger than the area that the NDVI values decreased. The improved vegetation area occupies 55.90% of the basin, while the degenerative vegetation-covered area accounts for 29.60%. The other 14.51% of the total area remained unchanged during the period of 2001–2013. We also found that the changes in vegetation coverage are more positively correlated with temperature in most part of the basin, while precipitation is not obviously sensitive to vegetation change in the water-rich eastern region, which suggested that temperature is the controlling climatic factor. Meanwhile, local vegetation changes are significantly affected by human activities. These results have provided scientific foundations for protecting the water resource and ecological environment of the drainage basin.

Keywords: Lake Qiandao drainage basin; vegetation dynamical status; spatial-temporal patterns; trend analysis

千岛湖是我国华东地区的一座特大型水库,在饮用水供给、防洪与发电、保障农业灌溉与下游生态用水及发展旅游等方面发挥着极其重要的作用,同时也是长三角地区重要的生态屏障.然而近年来由藻类异常增殖引起的水环境及生态问题日趋凸显^[1-3],作为我国首批24个水质良好湖泊生态环境保护试点之一,千岛湖绝不能走“先污染、后治理”的老路.因此,加强千岛湖流域水资源与生态环境保护就显得尤为必要和紧迫.

植被作为陆地生态系统主要的土地覆被类型,是连接大气、土壤与水体的自然纽带,在水土保持、物质循环、能量流动及维持生态系统稳定方面具有十分重要的作用^[4-5].近年来实施的退耕还林还草工程显著减少了来自陆域人工生态系统的面源污染,同时自然植被覆盖可以提升对氮、磷的拦截与净化能力^[6].因此,流域植被覆盖状况对于水源地保护具有重要的指示作用.值得注意的是,当前的水质目标管理不仅要着眼于湖库水质参数控制,更应该从源头从整个流域的角度维系生态平衡.

针对千岛湖流域,已有研究从土地利用变化的生态环境效应及不同土地利用方式对氮、磷流失的影响机理进行分析^[7-8],然而应用时间序列遥感数据监测流域植被长期动态还鲜有涉及.地表植被在生长过程中不仅受到气候因子的作用,同时在人类活动影响日益剧烈的今天,植被覆盖变化还深刻地记录着人类活动的烙印^[9].归一化植被指数(NDVI)作为表征地表植被生长状况的敏感度量参数,能够在较大时空尺度客观地反映研究区植被覆盖信息,在生态、环境和农业等领域得到广泛的应用^[10-12].对于千岛湖这种筑坝蓄水形成的山地型深水人工水库而言,生态环境比较脆弱,一旦破坏将难以修复.鉴于上述情况,本研究以250 m的MOD13Q1为数据源,通过数据预处理获得2001–2013年千岛湖流域年均NDVI时间序列,采用最小二乘法趋势分析和Mann-Kendall检验方法,探讨十多年来流域植被覆盖的空间分布特征、时间变化特征以及变化趋势特征,而后利用流域9个气象站点的气温与降水资料,定量分析千岛湖流域植被变化的气候因子驱动响应,并探讨其人类活动干扰影响,以期为进一步加强植被恢复,维护流域生态安全提供依据.

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

本研究所用数据来源于美国NASA的MODIS植被指数产品数据MOD13Q1.数据空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,时间范围从2001年1月至2013年12月.首先利用MRT(MODIS ReProjection Tools)软件进行格式转换与投影转换,把Hdf格式转换为Geotiff格式,把Sinusoidal投影转换为WGS84/Albers Equal Area Conic投影,重采样方法及分辨率分别为邻近自然法和250 m.然后采用最大值合成法获取2001–2013年逐月NDVI数据,以尽量去除云、雾和太阳高度角等因素对NDVI的影响^[13-14].最后利用均值法获取逐年年均的NDVI数据集进行年际变化特征分析.为比较植被类型空间分布及其组成结构对流域植被NDVI的影响,本研究还基于国产环境星数据(空间分辨率为30 m),利用面向对象的分类方法,解译获取研究区2010年土地利用/覆被数据.

气象数据主要包括安庆、宁国、黄山、景德镇、屯溪、淳安、金华、衢州、玉山等站点的气温和降水资料,时间跨度与MODIS时间序列数据一致,数据下载于中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>).在ArcGIS

中通过 Kriging 插值将气温和降水生成与 NDVI 数据相同投影方式和空间分辨率的栅格数据,而后进行植被覆盖变化的驱动因素分析.

1.2 研究方法

将最小二乘法趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验方法结合进来判断长时间序列趋势,其优势在于不需要数据服从一定的分布,对数据误差具有较强的抵抗能力,对于显著性水平的检验具有坚实的数理统计基础,使得结果更为科学和可信^[15-18]. 其中,最小二乘法对时间自变量与 NDVI 因变量数据集,通过计算逐像元 NDVI 与时间的回归斜率来判断其变化趋势. 若 $slope > 0$,说明 NDVI 的变化趋势是增加的,反之则是退化的.

$$slope = \left(\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) \right) / \left(\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2 \right) \quad (1)$$

式中,变量 i 为年序号, x_i 为第 i 年的 NDVI 值, t_i 为 x_i 对应的时间, n 为所研究的时间序列长度. 运用 ArcGIS 栅格运算功能,得到 NDVI 在 2001—2013 年的变化趋势图,可直观地反映 13 年间千岛湖流域植被动态趋势.

Mann-Kendall 是一种非参数统计检验方法,用来判断变化趋势的显著性程度. 定义 Z 统计量为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{s(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{s(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases}, s(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (4)$$

式中,sgn 是符号函数,统计量 Z 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$. 在给定显著性水平 α 下,当 $|Z| > \mu_{1-\alpha/2}$ 时,表示序列在 α 水平下存在显著变化. 本文判断 α 为 0.05 置信水平上 NDVI 时间序列变化趋势的显著性.

2 结果与分析

2.1 植被空间分布特征

利用 2001—2013 年的年均 NDVI 数据,计算近 13 年来年均 NDVI 空间分布,结果表明,千岛湖流域植被状况整体较好,具有较高的 NDVI 值(图 1),这主要是由于 80.36% 的流域面积为林地所覆盖(图 2),且以常绿针叶林与常绿阔叶林为主,分别占流域面积的 44.31% 和 28.83%. NDVI 空间分布同时也表明受人为干扰较大的地域,NDVI 显著较低,如以各县城镇为中心的建设用地,涵盖其周边地区,由于经济较为发达,人为开发改变了自然状态下的土地利用方式. 而远离城镇、海拔较高的地域,植被 NDVI 值较高. 对比图 1 与图 2 还发现,农业用地年均 NDVI 明显较低,然而其开发规模仅次于林地,位居流域面积第二位,其中又以水田占绝对优势,约为 10.42%,旱地只存在于少数缺水或地势较高地域. 耕地主要集中分布在流域上游安徽地区,说明千岛湖上游农业开发较为严重,相应地所面临的农业面源污染风险也越大,从而对流域水生态环境保护构成一定的威胁,而在浙江部分耕地仅在山间河谷零星分布. 但是必须值得重视的是,城镇用地及农业用地多分布在河、湖等水源地附近敏感区,其带来的生活污水及氮、磷面源污染最容易对水源地构成威胁. 当前已有研究表明^[19-20],随着城市化进程的加快,不断增长的裸露城镇地表环境促使非点源污染降雨径流成为城市地表水环境污染的主要原因,同时也加剧了流域河流水质的污染程度. 而自然状态下的林地水土保持能力则很强,尤其是在流域主要产流区和水量供给区的上游地区,河流附近区域需要限制开发、着重保护.

近 13 年 NDVI 平均值的分级统计结果表明:NDVI 值小于 0.45 的区域占流域总面积的 3.15%,0.45~0.65 的低值区占 14.13%,大于 0.65 的高植被覆盖区占 82.72%.

图1 千岛湖流域2001—2013年年均NDVI空间分布

Fig. 1 Distribution of multi-year annual mean NDVI for the Lake Qiandao drainage basin from 2001 to 2013

图2 千岛湖流域土地利用/覆被类型图

Fig. 2 Land use/land cover map of the Lake Qiandao drainage basin

2.2 植被时间分布特征

为了研究千岛湖流域植被覆盖区域NDVI随时间变化的特点,取2001—2013年年均NDVI值代表当年的植被状态,年际变化如图3所示,千岛湖流域植被年均NDVI值在0.69~0.73之间波动,其中2001—2003年NDVI值呈上升趋势,而后直至2006年呈现明显降低的趋势,但在2007年有一个较大的波动,NDVI值达到最大,结合气象因素分析表明,NDVI值与温度呈显著正相关关系,其中在2007年年均温度达到最高;而后自2008年以来,尽管NDVI值有一定的波动,但整体仍呈现出弱增长趋势,说明植被生长状况正在好转。

对常绿植被与落叶植被而言,夏季均为其生长旺盛期,植被 NDVI 值差别不大,对降雨条件下的氮、磷流失过程影响差异不显著;而春季降雨也较多,流域内落叶植被的空间分布状况及其组成结构对面源污染的贡献则远大于常绿植被.因此为了探索年内季节性植被动态变化特征对流域水环境污染的风险影响,本研究又结合物候学原理选取冬季 1 月与夏季 7 月两个时段千岛湖周边区域(浙江部分) NDVI 值进行深入分析,同时划分为若干个子流域,以重点研究不同区域植被对流域 NDVI 值贡献的大小,还可以为需要重点改善与污染防治的区域提供数据参考.

千岛湖南部各子流域 NDVI 年内季节变化不大(图 4),主要表现为南部多分布常绿植被,如竹林、马尾松、茶园、橘园等;而北部子流域年内差异显著,多分布落叶植被,大片的山核桃园、板栗园集中分布在淳安县西北部瑶山乡、屏门乡及玉阜乡境内.由于园地通常要施用大量的肥料,受降水作用影响,会对流域河流水质带来严重的氮、磷等面源污染,尤其是春季,雨水较多,这也可能是造成春季河、湖水质较差的主要原因,需要采取一定的工程措施降低氮、磷污染风险.

图 3 2001—2013 年千岛湖流域年均 NDVI 变化

Fig. 3 Long-term trend in annual mean NDVI of the Lake Qiandao drainage basin from 2001 to 2013

图 4 千岛湖周边各子流域夏季与冬季 NDVI 空间分布

Fig. 4 Contrast of NDVI in summer and winter for the sub-watersheds nearby the Lake Qiandao

由图 5 可知,2001—2006 年,环湖分区与流域其他各分区植被动态保持一致,而自 2007 年受气温影响达到峰值之后,近年来各分区趋势呈显著差异.具体而言,除环湖分区 NDVI 呈显著降低外,其余各子流域均呈增长趋势,只是显著性程度有所差别;南部分区、东部分区以及西南分区植被覆盖状况最好,且近年来仍呈增长态势,尤其是东部分区,增长尤为显著;北部分区与西部分区近年来植被虽有微弱增长趋势,但由于受开发等人类活动影响,植被覆盖状况相对最差,需要尤为关注;流域上游分区植被覆盖状况整体较淳安县

差,近年来有所改善.综上所述,人类活动对植被覆盖有显著性影响,尤其在环湖地区.

图 5 2001—2013 年千岛湖流域各分区 NDVI 变化趋势

Fig. 5 Tendency in NDVI of per sub-watershed for the Lake Qiantao drainage basin from 2001 to 2013

表 1 2001—2013 年千岛湖流域植被变化趋势及各分区所占面积统计分析

Tab. 1 Statistics of tendency of annual mean NDVI in the Lake Qiantao drainage basin from 2001 to 2013

Slope 值	Z 值	变化趋势	面积所占比例
>0.0005	>1.96	显著改善区	14.46%
>0.0005	$-1.96 \sim 1.96$	轻微改善区	41.44%
$-0.0005 \sim 0.0005$	$-1.96 \sim 1.96$	稳定区	14.51%
<-0.0005	$-1.96 \sim 1.96$	轻微退化区	25.63%
<-0.0005	<-1.96	严重退化区	3.97%

要集中分布在城镇周边及沿河地带,以及流域边界海拔较高地区;而在浙江部分退化区分布则较为分散,并且主要表现为轻微退化,更可能是由于人类活动影响造成的.稳定区在流域内呈现零散分布.而整个流域的植被显著改善区也主要分布在千岛湖流域上游安徽部分,其余地区也有轻微改善(图 6).

2.4 气候因子及人类活动对 NDVI 的影响分析

气候变化被认为是引发地表覆盖变化的主要原因之一,通过 NDVI 研究植被覆盖与气候的关系一直是国内外全球变化研究的主要内容.目前许多研究表明 NDVI 与气候因子存在明显的相关关系,因此将气候因子作为植被覆盖变化的驱动因素是气候和植被变化研究的重要内容.

从对千岛湖流域 13 年来的年均 NDVI 值与年均气温和年降水量进行相关性分析与统计结果(图 7、表 2)可以看出,千岛湖流域植被大部分与气温呈现显著的正相关关系,所占面积比例约为 77.55%,说明气温升高一定程度上刺激了植被的生长.同时相关性分析也表明,部分植被并没有与气温呈正相关,相反呈低度负相关,排除局部零星的人类活动干扰之外,说明气温只能在一定范围内发挥正效应,一旦超过植被功能型的最适温度上限反而会抑制其生长.年均降水量与 NDVI 值的相关性分析表明,虽然流域植被整体与降水的正相关性(56.12%)高于负相关性(43.87%),但显著性相关部分所占比例并不高,也间接表明对于降水丰富的东部地区,水分并非植被生长的限制性因子,大部分地区降水能够满足植被生长的需要,这一结果与王永财等^[21]在海河流域植被覆盖变化的气候因子驱动分析结果相反,说明不同土地利用/覆被特征下,流域植被变化的气候主导因素存在显著差异.

2.3 植被覆盖变化趋势分析

将最小二乘法趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验结果结合起来,可以有效地反映 2001—2013 年千岛湖流域植被 NDVI 变化趋势的空间分布特征.本研究将回归斜率 slope 介于 $-0.0005 \sim 0.0005$ 之间的区域划分为稳定区,高于 0.0005 的划分为改善区域,而低于 -0.0005 的划分为退化区域.同时将 Mann-Kendall 检验在 0.05 置信水平上的显著性检验结果划分为显著变化($Z > 1.96$ 或 $Z < -1.96$)与变化不显著($-1.96 \leq Z \leq 1.96$).最后,将趋势分析结果与 Mann-Kendall 检验结果进行叠加分析,得到像元尺度上的 NDVI 变化趋势数据,并将结果划分为严重退化区、轻微退化区、稳定区、轻微改善区与显著改善区 5 种类型.结果表明,植被覆盖状况改善的区域约占流域面积的 55.90%;相对稳定不变区域约占 14.51%;植被呈现出一定退化状态的区域约占 29.60%,其中严重退化区域仅占 3.97%(表 1).

对整个流域而言,植被状况改善的区域所占面积比例远高于退化区域.其中在流域安徽部分,退化区主

图 6 2001—2013 年千岛湖流域植被变化趋势

Fig. 6 Tendency of annual mean NDVI variations in the Lake Qiantao drainage basin from 2001 to 2013

图 7 2001—2013 千岛湖流域年均 NDVI 与年平均气温(a)、年平均降水量(b)的相关性分析

Fig. 7 Correlations between annual mean NDVI and the corresponding temperature (a) and precipitation (b) in the Lake Qiantao drainage basin from 2001 to 2013

表 2 千岛湖流域年均 NDVI 与年均气温、降水量的相关性分布统计

Tab. 2 Statistics of correlations between annual mean NDVI, temperature and precipitation in the Lake Qiantao drainage basin

气温相关性	系数范围	比例	降水相关性	系数范围	比例
高度负相关	< -0.6	0.09%	高度负相关	< -0.6	0.37%
中度负相关	-0.6 ~ -0.3	3.08%	中度负相关	-0.6 ~ -0.3	10.36%
低度负相关	-0.3 ~ 0	19.46%	低度负相关	-0.3 ~ 0	33.14%
低度正相关	0 ~ 0.3	40.52%	低度正相关	0 ~ 0.3	35.51%
中度正相关	0.3 ~ 0.6	33.06%	中度正相关	0.3 ~ 0.6	18.98%
高度正相关	> 0.6	3.79%	高度正相关	> 0.6	1.63%

人类活动在一定程度上也或正面或负面地影响着流域植被覆盖的变化. 近年来依托生态公益林建设工程、水源地保护工程、退耕还林还草工程等生态建设重点工程, 开展河、湖等水源地附近的植树造林、水土流失防治、裸地治理、自然保护区建设和生物多样性保护等工作, 使流域植被得到一定的恢复, 水土流失也得以改善. 而负面的影响主要有河、湖等水源地附近的城镇建设用地仍在大规模增加, 势必占用周边地区的农田及林地等植被, 有可能会带来植被破坏、土壤性质改变、局地小气候变化, 使半自然或自然景观改变为城市景观. 同时, 大面积开发自然林地, 新建经济效益更高的茶园、果园等经济作物还在继续. 而随着流域景观破碎度增加, 生物多样性将减少, 对流域水生态环境保护也将产生一系列不利影响. 因此, 应尽快按照流域生态功能分区总体布局、统筹规划、着重保护, 实现人与自然是和谐友好共同发展.

3 参考文献

- [1] 罗献宝, 文军, 骆东奇等. 千岛湖水质变化特征与趋势分析. 中国生态农业学报, 2006, **24**(4): 208-212.
- [2] 吴志旭, 兰佳. 新安江水库水环境主要问题及保护对策. 中国环境管理, 2012, (1): 54-58.
- [3] 韩晓霞, 朱广伟, 吴志旭等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 836-845.
- [4] 范娜, 谢高地, 张昌顺等. 2001至2010年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析. 资源科学, 2012, **34**(7): 1222-1231.
- [5] 邵怀勇, 武锦辉, 刘萌等. MODIS多光谱数据研究攀西地区植被对气候变化响应. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(1): 167-171.
- [6] 李恒鹏, 朱广伟, 陈伟民等. 中国东南丘陵山区水质良好水库现状与天目湖保护实践. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 775-784.
- [7] 吕焕春, 薛生国, 方志发等. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响. 中国地质, 2004, **31**: 112-117.
- [8] 索俊峰. 千岛湖镇土地利用变化的生态环境效应研究. 土壤通报, 2011, **42**(2): 267-272.
- [9] 李学梅, 任志远, 张翀. 气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析. 地理科学, 2013, **33**(11): 1390-1394.
- [10] Nathalie P, Jon OV, Atle M *et al.* Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, **20**: 503-510.
- [11] Brian DW, Stephen LE. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U. S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 1096-1116.
- [12] 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.
- [13] Holben BN. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, **7**(11): 1417-1434.
- [14] 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. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(11): 1514-1520.
- [15] Lunetta RS, Knight JF, Ediriwichejuma J *et al.* Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **105**: 142-154.
- [16] Cai BF, Yu R. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(6): 1170-1186.
- [17] Yu K, Hu C. Changes in vegetative coverage of the Hongze Lake national wetland nature reserve; a decade-long assessment using MODIS medium-resolution data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, **7**: 0735891-07358912.
- [18] Russell JM, Ward D. Remote sensing provides a progressive record of vegetation change in northern KwaZulu-Natal, South Africa, from 1944 to 2005. *International Journal of Remote Sensing*, **35**(3): 904-926.
- [19] 陈伟伟, 詹小来, 曹惠提等. 城市雨水径流非点源污染研究进展. 节水灌溉, 2011, **12**: 50-52.
- [20] 李义禄, 张玉虎, 贾海峰等. 苏州古城区水体污染时空分异特征及污染源解析. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 1032-1044.
- [21] 王永财, 孙艳玲, 王中良. 1998~2011年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析. 资源科学, 2014, **36**(3): 594-602.