

基于低层云的新疆城市区域人工增水潜力分析

阿丽亚·拜都热拉¹, 玉米提·哈力克¹,
陈勇航², 崔彩霞³, 阿依古扎², 喀哈尔·扎依木¹

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院 新疆维吾尔自治区绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046;

2. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 3. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘要:基于2003—2007年CERES SSF Aqua MODIS Edition 2B/2C数据集,利用Surfur、IDL等软件对低层云量、水云云水柱含量、水云粒子半径、冰云云水柱含量和冰云粒子等效直径等低层云参量多年高值的空间分布、季节变化进行了综合分析,重点探讨了新疆城市地区云水资源潜力。结果发现:研究区域的低层云参量多年平均值的高值分布在三大山区,低值分布在塔克拉玛干沙漠;部分典型的干旱城市也出现了低云参量的高值区,例如和田、克拉玛依、哈密;在吐鲁番地区春夏季冰云云水柱含量和冰云粒子等效直径多年均值高于秋冬季,有利于春夏季进行人工增水。

关键词:低层云水资源; 增水潜力区域; 分布特征

中图分类号:P426.5⁺2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)03-0278-05

Analysis on Potential of Water Resources in Lower Layer Clouds in City Area of Xinjiang

Aliya · Baidurela¹, Umut · Halik¹, CHEN Yong-hang², Cui Cai-xia³, Aigvzal², Kahar · Zhayim¹

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology of Xinjiang Uygur Autonomous Region, College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University; Urumqi 830046, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China)

Abstract: The ways of defining the potential areas of lower layer cloud resources was discussed by analyzing the parameters of lower layer clouds including coverage, liquid water path, ice water path, liquid particle radius and ice particle effective diameter based on CERES SSF Aqua MODIS Edition 2B/2C cloud data from CERES of NASA EOS from December, 2002 to December, 2007. According to the different multi-year average values of the parameters, the high value areas of the five parameters are generally located in the mountains and low-value areas are located in the basins with deserts. What should be noticed is that some areas got the lowest values of the multi-year average but their liquid water path and water particle radius are high enough to try artificial rainfall, especially in spring and summer.

Key words: lower layer cloud resources; potential areas; distribution characteristics

新疆多年平均降水量只占全国平均降水量的23%。虽然新疆地广人稀,无论是人均年降水总量还是人均年水资源占有量均为全国人均的两倍多,且近几十年来新疆的降水有明显增加的趋势,但是目前人口与经济集中的城市地区水资源短缺现象较为严重^[1]。其原因从自然条件看,地表水和地下水从山区向绿洲移动过程中的蒸发和渗漏损失较大,农闲的冬季降水较多且为固态形式难以直接利用,作物生长旺

盛的夏季却降水较少。人为原因包括上游层层拦截导致中下游径流减少甚至枯竭,大水漫灌造成的水资源浪费,人口与经济集中在降水偏少、气温偏高的绿洲内部——特别是其中的城镇地区等。另外,气候变暖导致的冰雪消融加速,有可能影响到未来的江河水源。人工增水作为传统水资源开发的补充,近年来受到各方关注。低云是人工增雨的重要对象,同时也是天气预报与气候预测的重要因子。然而长期的以来

收稿日期:2012-10-09

修回日期:2012-12-09

资助项目:国家自然科学基金项目(31270742);国家科技支撑计划项目(2012BAC23B01);国家自然科学基金项目(41175026)

作者简介:阿丽亚·拜都热拉(1986—),女(维吾尔族),新疆托克逊县人,在读博士生,主要研究方向为生态学。E-mail:aliya_12@163.com

通信作者:玉米提·哈力克(1966—),男(维吾尔族),教授,博士,从事干旱区恢复生态与景观规划方面的研究。E-mail:halik@xju.edu.cn

地面常规云观测受到技术和经费的限制,长期以来的只能取得人工目测的云量资料,而云具有时空上的多变性,这就使得以往国内外关于云特性的监测和研究相当缺乏。国外学者 Stephens, Platt, Heymsfield 等详细地给出了不同云参量的获取方法和过程, Rossow、Minnis 等学者利用卫星观测资料对云做了不少的研究^[2]。我国学者如丁守国等^[3]利用国际卫星云气候计划(International Satellite Cloud Climatology Project ISCCP)的月平均资料,给出了总云量及高、中、低云在全球的分布特征及其近 20 a 来的变化趋势;王可丽等^[4]对比分析了观测资料和地面测站云资料的差异;宜树华等^[5]对中国不同地区云的时空分布特征进行了研究;陈勇航等^[6]对西北地区云量、云光学厚度、云水路径的时空分布特征进行了分析。近几年,利用更高空间分辨率的 Aqua 卫星资料,王玉洁^[7]、贾璇^[8]等研究了沙尘对云的影响;陈勇航^[9-11]、程肖侠^[12]等分析了我国西北地区云特性的季节及年变化特征,探讨了云特性参量对云辐射强迫的影响;李积明等^[13]利用 CALIPSO 卫星的云数据,总结分析了东亚地区云的云顶和云底高度区域和年变化特征。上述研究结果为云水资源开发利用和天气预报与气候预测提供了参考。

最近,针对新疆山区云水资源的研究逐步开展,多数研究表明^[14-16],山区云水资源丰富,但是一般山区附近没有太多居住人口且没有大型农田或工业用水需求,人工增加的雨水无法使用到实处,实现预计目标^[17]。因此,本文拟通过分析全疆低层云水资源各种参数高值区,进行城市站点人工增水潜力的具体分析,特别是针对一些人口密集、常年发生旱灾的绿洲城市地区的云水资源进行分析,给出了这些站点的参量高值信息,从而为人工增雨点提供新的观测事实和数据参考。

1 资料与方法

本文采用的数据来源于美国宇航局 NASA(National Aeronautics and Space Administration)发布的 2003—2007 年 CERES SSF Aqua MODIS Edition 2B/2C 数据集。“云与地球辐射能量系统(CERES)”是地球观测系统(EOS)的重要组成部分。本文采用的云特性产品是经过一系列反演计算得到的,反演云特性过程中采用了搭载在 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)获取的观测数据^[18-19]。Aqua 卫星的主要使命是研究地球水循环,并促进人类对全球气候变化的了解。卫星上的 6 个仪器用于搜集全球

降雨、水蒸发、云层形成、洋流等水循环活动数据。利用这些数据,可以更深入地研究地球水循环和生态系统的变化规律。对每个像素点,CERES 系统用最先进的方法来获取云顶/云底的温度和气压、等效辐射中心、云粒子的相态和等效尺度、在 0.65 mm 波长处的云光学厚度、在 10.8 mm 波长处的云发射率以及云的液相和冰相云水含量等参量^[9]。文中的参量具体为:

水云云水柱含量,是指大气中两个点之间的液态水总含量,单位为 g/m^2 或 kg/m^2 ,在理解大气辐射传输的过程中具有重要的意义。其一般表达式为:

$$\text{LWP} = \int_{z=0}^{\infty} \rho_{\text{air}} r_L dz$$

式中: r_L ——液态水的混合比例; ρ_{air} ——空气密度。

冰云云水柱含量,被定义为冰水含量对冰云层深度的积分,是气候研究过程中必不可少的参量,并在确定云的吸收量、光学厚度、反照率,发射量中起至关重要的作用。其一般表达式为:

$$\text{IWC} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) m(D) dD$$

$$\text{IWP} = \int_{h_{\text{base}}}^{h_{\text{top}}} \text{IWC} dh$$

式中:IWC——冰云云水含量; N ——浓度; m ——质量; D_{\min} ——探测器测量阈值; D_{\max} ——粒度分布中最大的粒子直径;IWP——冰云云水柱含量; h ——海拔高度; h_{top} ——云的顶部高度; h_{base} ——云的底部的高度^[18]。本文采用 CERES 计算该参量的公式为:

$$\text{IWP} = A_0 D_e + A_1 D_e^2 + A_2 D_e^3 + \tau$$

$$A_0 = 0.259$$

$$A_1 = 8.19 \times 10^{-4}$$

$$A_2 = -8.8 \times 10^{-7}$$

式中: τ ——光学厚度。冰云粒子有效半径或有效直径是大气环流模式里代表云层辐射特性的关键变量,通过冰云云水含量(IWC)和消光系数 σ 计算得到^[19]。水云粒子有效半径,是确定云粒子尺度大小的重要参量之一,其一般表达公式为:

$$r_e = \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr / \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr$$

式中: r_e ——粒子有效半径; $n(r)$ ——粒度分布; r ——粒子半径^[20]。

云量按高度分两个云层,高层云量和低层云量,此处讨论的是低层云。云层参量基于整个相应云层的云覆盖率。其计算公式如下:

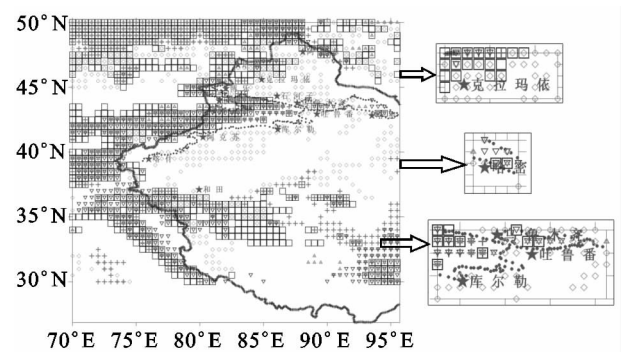
$$C_{L1} = \left(\frac{\sum_i \omega_i f_{L1}^i}{\sum_i \omega_i} \right) \times 100$$

式中: C_{L1} ——低层云; i ——相应云层; ω_i ——点扩散函数对 i 的重积分; S_i ——晴朗比多云观察箱的指数集; f —— i 位置晴朗时的像素分数; $L1$ —— i 位置只有低层云时的像素分数^[21]。

2 结果与分析

2.1 低层云参量多年平均值的空间分布特征

对 2003 年 12 月至 2007 年 12 月的云参量值进行平均,选出各个参量的高值,用不同符号表达不同云参量的具体地理位置(图 1)。



注:+:低层云量;▽:水云粒子等效半径;◇:冰云云水柱含量;△:冰云粒子等效直径;□:水云云水柱含量。

图 1 新疆城市区域多年高值分布区

本文采选高值的参量包括水云云水柱含量、水云粒子等效半径、冰云云水柱含量、冰云粒子等效直径和低层云量。每个参量的多年平均值分成 3 个值域段,为了辨别高值区域,图 1 中只显示了各参量最大的一个值域段,对于水云云水柱含量而言,只显示了大于 45 g/m^2 的区域,水云粒子等效半径大于 $12\text{ }\mu\text{m}$ 的区域,冰云云水柱含量大于 100 g/m^2 的区域,冰云粒子等效直径大于 $45\text{ }\mu\text{m}$ 的区域,低云量大于 25% 的区域。水云云水柱含量高值分布在天山、阿勒泰山和昆仑山区域,尤其是西天山区域是高值密集分布的区域。从低层云参量的多年平均值空间分布来看,低层云的云量、液态水柱含量、水云粒子半径、冰云云水柱含量和冰云粒子等效直径分布形式大致相似,三大山区处于高值区,塔克拉玛干沙漠的大部分区域处于低值区,这与新疆地区的降水分布有较好的一致性。水云云水柱含量高值分布在天山、阿勒泰山和昆仑山区域,尤其是西天山区域是高值密集分布的区域;其分布特征与水云云水柱含量相似,均为山区分布密集,相对水云云水柱含量,水云粒子等效半径表现为东天山部分出现高值的频率较高,尤其是哈密地区。除了山区之外还有一些平原城市也出现了水云,水柱含量的高值,具体有克拉玛依和石河子。总体上冰云云水柱含量和冰云粒子有效直径多年平均值的高值区集中在天山和昆仑山区,阿尔泰山处于高值区和低值区的过渡带上,沙漠和盆地则是低值区。冰云云水柱含量高值区(低值区)对应于粒子有效直径高值区

(低值区),新疆沙漠地区和吐鲁番地区的值明显比山区低。冰云云水柱含量出现高值的城市有:克拉玛依、库尔勒、喀什、哈密,冰云粒子等效直径出现高值的城市有哈密。

低云量多年时空分布特征与前面几个参量相似。高值出现在喀什,阿克苏,和田,库尔勒,克拉玛依,哈密等一些人口密集需要多量降水的绿洲城市。从地形上看,新疆西部多为山区,空气中的水汽资源来自两方面:一是来自当地下垫面的蒸发;二是来自大气的输送。随着地势的升高,暖湿气流被迫抬升,容易成云致雨。因此,新疆的降水量表现为西部地区高于东部地区。

上述结果与宜树华^[4]、陈勇航^[5]等得出的新疆三山地区是云水资源的主要分布区域的结论一致。说明山脉地形对低层云量、水云粒子等效半径、冰云云水柱含量、冰云粒子等效直径、水云云水柱含量等云参量高值的形成有很大的影响,这与暖湿气流遇到高山被迫抬升容易凝结形成冰云有关。另外值得注意的是这些站点中分布在北疆地区的站点占多数,北疆的地面水资源比南疆丰富,这些地上水资源经过蒸发循环,为云水资源的形成提供了有利条件。

2.2 城市区域云水资源潜力分析

以气候干燥、年降水量少、蒸发量高的几个城市为例,具体分析每个城市 5 个云参量的多年平均值,结果如表 1 所示。表 1 中,横向来看,每个城市对应的不同云参量多年平均值均高于对应的全疆最低值,有的甚至高处了全疆平均值,如和田市的多年平均低云量 26.64% 高于全疆平均低云量 26.14%。哈密市的多年平均水云粒子等效半径值 $11.62\text{ }\mu\text{m}$ 和冰云粒子等效直径值 $42.38\text{ }\mu\text{m}$ 均接近全疆平均值 $12.20\text{ }\mu\text{m}$ 和 $42.69\text{ }\mu\text{m}$ 。同样克拉玛依市的多年平均水云云水柱含量值 50.53 g/m^2 和冰云云水柱含量值 99.43 g/m^2 均接近于全疆平均值 52.46 g/m^2 和 110.82 g/m^2 。纵向分析,和田市多年平均低云量值 26.6% 高于其他 5 个城市,克拉玛依市多年平均水云云水柱含量值 50.53 g/m^2 ,喀什市多年平均冰云云水柱含量值 108.98 g/m^2 ,哈密市多年平均水云粒子等效半径值 $11.62\text{ }\mu\text{m}$,和冰云粒子等效直径值 $42.38\text{ }\mu\text{m}$ 均高于其他城市。

虽然所选择的城市都属于典型的干旱区城市,但云参量多年平均值都接近于全疆平均值,有些甚至超过了均值,同时都远大于全疆最低值。可以得出,这些干旱区城市具有一定的云水资源,并同时具备了可以开发的潜能,在合适的时间进行人工降水有望实现较好的效果。

表 1 部分站点各参量多年平均值

站点	低云量/ %	水云云水柱含量/ (g·m ⁻²)	冰云云水柱含量/ (g·m ⁻²)	水云粒子等效 半径/μm	冰云粒子等效 直径/μm
吐鲁番	16.11	31.57	67.52	10.66	38.33
库尔勒	21.89	29.26	81.57	9.85	38.50
和田	26.64	36.75	92.59	9.64	38.16
喀什	24.22	39.96	108.98	10.89	42.01
哈密	17.88	38.73	81.50	11.62	42.38
克拉玛依	25.74	50.53	99.43	10.90	39.48
全疆平均	26.14	52.46	110.82	12.20	42.69
全疆最低	13.32	16.23	30.07	8.01	30.06

以吐鲁番市为例,分析其多年平均冰云云水柱含量与冰云粒子等效直季节分布情况。吐鲁番市多年平均冰云云水柱含量 67.52 g/m²,是全疆最低值 30.07 g/m² 的 2.3 倍,是全国均值的 61%,说明吐鲁番具有一定的可开发的云水资源。吐鲁番盆地 1968 年曾出现 0.5 mm 的全国最低年雨量极值,成为全区乃至我国的“旱极”。吐鲁番是各参量最低值出现最多的城市,不过其中水云云水柱含量和水云粒子等效半径值却不是最低值,因而也可以尝试进行人工降水,尤其在春夏季节,由图 2 可看出,春夏季是吐鲁番冰云参云水柱含量和冰云粒子有效直径的高值期。

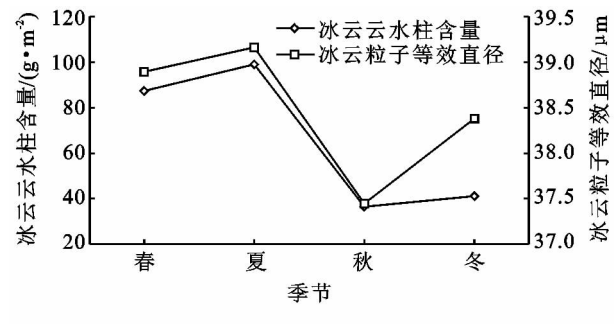


图 2 吐鲁番地区冰云云水柱含量与粒子等效直径多年平均季节变化特性

夏季云层水汽含量一般会超过冬季,但由于气温高,其相对湿度可能更低而难以形成降水,这时可进行人工干扰促进降水。

综上所述,从低层云参量的多年平均空间分布图来看,低层云的云量和液态水柱含量的分布形式大致相似,三大山区处于高值区,塔克拉玛干沙漠的大部分区域处于低值区,这与新疆地区的降水分布有较好的一致性。但值得注意的是,部分多年降水少,频繁出现旱灾的城市也出现了低云参量的高值区,例如和田和克拉玛依,哈密出现了水云粒子等效半径多年平均高值。另外根据不同参量多年平均值可知,吐鲁番是各参量最低值出现最多的城市,不过其中水云云水柱含量和水云粒子等效半径值并不是最低值,因而也可以尝试进行人工降水,尤其是在春夏季节。

3 结 论

本文综合分析了五种云参量的分布情况,并指出了参量高值密集区域所包括的城市,另重点讨论了没有出现高值但从季节分布的角度看仍然具有人工增水潜力的干旱城市,得出的结论如下:

- (1) 从低层云参量的多年平均空间分布来看,低层云的云量、液态水柱含量、水云粒子半径、冰云云水柱含量和冰云粒子等效直径分布形式大致相似,三大山区处于高值区,塔克拉玛干沙漠的大部分区域处于低值区,这与新疆地区的降水分布有较好的一致性。
- (2) 部分多年平均降水少且频繁出现旱灾的城市也出现了低云参量的高值区,例如和田和克拉玛依,哈密出现了水云粒子半径多年平均高值。
- (3) 从冰云云水柱含量和冰云粒子等效直径多年均值季节变化特征来看,吐鲁番地区冰云云水柱含量多年均值夏季最高,为 98.83 g/m²,春季其次,为 87.19 g/m²,均高于秋季和冬季;同样,粒子等效直径多年均值夏季最高,为 39.16 μm,春季其次,为 38.89 μm,均高于秋冬季,因而有利于在春夏季节进行人工增水。

参考文献:

[1] 邓铭江,李湘权,龙爱华,等. 支撑新疆经济社会跨越式发展的水资源供需结构调控分析[J]. 干旱区地理, 2011,34(3):379-390.

[2] Minnis P, Young D F, Sun-Mack S, et al. CERES Cloud Property Retrievals from Imagers on TRMM, Terra, and Aqua[R]. Barcelona, Spain: SPIE 10th Intl. Symp Remote Sens., Cloud and Atmos., 2003.

[3] 丁守国,石广玉,赵春生. 利用 ISCCPD2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响[J]. 科学通报, 2004,49(11):1105-1111.

[4] 宜树华,刘洪利,李维亮,等. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析[J]. 气象, 2003,29(1):7-11.

[5] 陈勇航,黄建平,王天河,等. 西北地区不同类型云的时

- 空分布及其与降水的关系[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 717-727.
- [6] Su Wenying, Bodas-Salcedo A, Xu Kuan-Man, et al. Comparison of the tropical radiative flux and cloud radiative effect profiles in a climate model with Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) data[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D1): D01105.
- [7] 王玉洁, 黄建平. 一次沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理参量和辐射强迫的影响[J]. 干旱气象, 2006, 24(3): 14-18.
- [8] 贾璇, 王文彩, 陈勇航, 等. 华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响[J]. 环境科学, 2010, 30(8): 1009-1014.
- [9] 陈勇航, 白鸿涛, 黄建平. 西北典型区域云对地气系统的辐射强迫研究[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2): 97-101.
- [10] Chen Yonghang, Peng Kuanjun, Huang Jianping, et al. Seasonal and regional variability of cloud liquid water path in northwestern China derived from MODIS/CERES observations[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(4): 1037-1042.
- [11] Chen Yonghang, Bai Hongtao, Huang Jianping, et al. Seasonal variability of Cloud Optical Depth over Northwestern China derived from CERES/MODIS Satellite Measurements[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(4): 454-457.
- [12] 程肖侠, 方建刚, 孙嫻, 等. 陕西省可利用降水资源的气候变化特征及敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 45-51.
- [13] 李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征[J]. 大气科学, 2009, 33(4): 698-707.
- [14] 袁再健, 沈彦俊, 褚英敏, 等. 海河流域近 40 年来降水和气温变化趋势及其空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 24-27.
- [15] 阿丽亚·拜都热拉, 邱学兴, 陈勇航, 等. 新疆山区低层冰云云水资源初探[J]. 资源科学, 2011, 33(9): 1727-1734.
- [16] 张来章, 党维勤, 徐成. 水土保持补偿机制中存在问题及其建议与对策[J]. 水土保持研究, 2009, 16(6): 184-189.
- [17] 奚秀梅, 树国. 塔里木河中游径流量损耗特征及原因分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 34-38.
- [18] Platt C M R, Harsh V. Temperature dependence of cirrus extinction: implications for climate feedback[J]. Geophys. Res., 1988, 93(11): 11051-11058.
- [19] Heyms F, Andrew J, Carl S, et al. Effective radius of ice cloud particle populations derived from aircraft probes[J]. Atmos. Oceanic Technol., 2006, 23(1): 361-380.
- [20] M D. King, S E, Platnick, Menghua Wang. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBD-MOD-05, MOD06-Cloud product, Version 5 [M]. NASA Goddard Space Flight Center. USA. 1997: 11-12.
- [21] Erika B G, Richard N G, David P K, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), Data Management System, Single Satellite Footprint TOA/Surface Fluxes and Clouds (SSF) Collection Document, Version 1 [M]. NASA Langley Research Center Climate Science Branch Science Directorate, Hampton. 2003: 81-82.

(上接第 277 页)

- [10] 张建杰, 张改清. 中原经济区现代农业主体功能区划及其发展[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(4): 402-405.
- [11] 傅建春. 河南省土地资源安全问题初探[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(12): 5171-8172.
- [12] 田克明, 王国强. 河南省农用地生态安全评价探讨[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 156-158.
- [13] 刘蕾, 姜灵彦, 高军侠. 基于 P-S-R 模型的土地生态安全物元评价: 以河南省为例[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(4): 117-121.
- [14] 王恒伟, 廖和平, 赵宏伟, 等. 基于 PSR 的区域生态安全评价: 以重庆市渝北区为例[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 35(2): 211-217.
- [15] 林崑. 绿色农业意识增强河南农民化肥用量首次下降 [EB/OL]. (2004-06-08) [2004-06-08] <http://news.sohu.com/2004/06/08/16/news220431674.shtml>
- [16] 潘春彩, 李荷香, 吴国玺. 许昌市土地资源利用状况及对策研究[J]. 河北农业科学, 2010, 14(2): 107-108.
- [17] 王安周, 张桂宾, 郑洁, 等. 新乡市土地利用动态变化分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 163-165.
- [18] 苏朝阳, 苗长虹. 开封市土地利用时空变化的生态系统服务价值评估[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 116-119.