

## 2004—2013 年云南省春旱时空特征分析\*

吴健生<sup>1,2</sup>, 任奕蔚<sup>1</sup>, 张曦文<sup>1</sup>

(1. 北京大学 城市规划与设计学院 城市人居环境科学与技术重点实验室 广东 深圳 518055;

2. 北京大学 城市与环境学院 北京 100871)

**摘要:** 21 世纪以来, 云南省频繁发生春旱, 严重影响了人类活动与自然环境. 为更科学地抗旱防旱, 运用 MODIS 遥感数据, 计算归一化干旱指数 NDDI, 分析了云南省 2004—2013 年春旱的时空变化特征. 结果表明: 研究期内, 云南省春旱反复发生, 空间差异增大, 其中 2010、2013 年旱情较为严重; 云南省东部、北部旱情严重, 西南部较轻微; NDDI 高值区集中于东南部与中北部, 低值区集中于西北部与东北部; 10 年间云南北部地区旱情严重加剧, 南部则有所缓解; 易旱植被类型主要为草原和耕地.

**关键词:** 干旱; NDDI; 云南省; 时空分析

**中图分类号:** P 426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-7971(2016) 06-0897-06

历年来, 旱灾一直是世界所关注的重大自然灾害之一. 随着全球经济飞速发展、人口不断增长, 干旱化、荒漠化现象也日趋严重. 干旱以其分布范围广、受灾人口多、发生频率高、持续时间长等特点, 严重影响了农业经济、自然生态、饮水安全、粮食安全与环境安全, 直接关系到人民的日常生活与和谐社会的稳定发展<sup>[1]</sup>. 建国以来, 政府一直十分重视防旱抗旱工作, 不断修建蓄水灌溉工程, 但区域干旱仍是我国经济社会持续快速发展的一大制约因素.

干旱被定义为持续 21 天以上且降雨量少于往年同期降雨量的 30% 的气候现象<sup>[2]</sup>. 作为世界上最严重的自然灾害类型<sup>[3]</sup>, 干旱也是我国农业经济损失最严重的气象灾害<sup>[4]</sup>. 随着旱灾频繁发生, 干旱的相关研究也越来越深入.

传统监测方法是台站网络监测, 但该方法费时费力, 且代表性较差<sup>[5-8]</sup>. 为实现大面积实时监测, 多时相遥感技术被用于干旱监测<sup>[9-10]</sup>. 国内外学者通过计算气象、水文、土壤、植被等不同方面的干旱监测指数<sup>[11-12]</sup>, 对干旱进行量化研究. 其中, Gu 等<sup>[13]</sup>在 2007 年提出的归一化干旱指数 (Normalized Difference Drought Index, NDDI), 同时考虑了地表植被情况与土壤水分变化情况. 相较于 TVDI、

MTVDI、NDVI、NDWI 等其他指数, 无论是裸地、稀疏植被覆盖区, 还是植被覆盖区或部分植被覆盖区, 该指数都有较好的普适性与敏感性, 在反映研究区域的干旱情况时具有一定的优势. 研究国内外相关文献可发现, 无论裸地、稀疏植被覆盖区, 还是植被覆盖区或部分植被覆盖区, 归一化干旱指数 NDDI 都有较好的普适性与敏感性. 云南省地表情况复杂, NDDI 在反映该研究区的干旱情况时有一定的优势.

因此, 本文利用多时相遥感数据, 通过计算归一化干旱指数 NDDI, 从时序特征、空间特征、时空演变特征 3 个方面来评估 2004—2013 年云南省的干旱情况, 从而研究云南省春旱的时空变化特征, 为抗旱防旱工作提供科学依据.

### 1 研究区概况

云南省位于中国西南边陲, 97°31'~106°11'E, 21°8'~29°15'N, 南部有北回归线贯穿而过, 总面积 394 000 km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>, 2014 年总人口 4 714 万<sup>[14]</sup>. 云南省属山地高原地形; 水系丰富, 但水流量年际变化大, 地域分布极不均匀. 云南属亚热带高原季风型气候, 分明显干、湿季<sup>[14]</sup>; 其动植物资源也极其丰富.

\* 收稿日期: 2016-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(41330747).

作者简介: 吴健生(1965-) 男, 湖南人, 博士, 教授, 主要从事遥感与 GIS、景观生态学与土地利用规划研究. E-mail: wujes@szpku.edu.cn.

我国结合农业生产习惯与干旱发生时间,将干旱分为春旱、夏旱、伏旱与秋旱<sup>[15]</sup>。由历史资料可知,云南省是春旱多发省份。21世纪以来,云南省降水减少,高温干旱频率增加<sup>[16]</sup>,旱灾的影响十分严重。因此,研究云南省干旱的时空变化特征任重道远。

## 2 方法与数据

本文运用 2004—2013 年年每年 1 月 1 日至 6 月 30 日的 MODIS 8 日合成地表反射率数据<sup>[17]</sup>,计算归一化干旱指数 NDDI。

NDDI 值越高,旱情越严重。其计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

其中,NDVI 为归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index),计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

式中  $\rho_1$  及  $\rho_2$  分别表示 MODIS 地表反射率数据中的第 1 通道红波段反射率和第 2 通道近红外波段反射率。

NDWI 为归一化差值水分指数(Normalized Difference Vegetation Index),计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$NDWI = \frac{\rho_2 - \rho_7}{\rho_2 + \rho_7}$$

式中  $\rho_2$  及  $\rho_7$  分别表示 MODIS 地表反射率数据中的第 2 通道近红外波段反射率和第 7 通道短波红外波段的反射率。

同时,白开旭等<sup>[18]</sup>在西南地区干旱研究中将 NDDI 与土壤湿度进行回归分析,得到  $R^2$  最高的方程:

$$y = -68.916x - 88.792$$

而后参考农业气象观测规范划分的干旱等级标准,基于上述 NDDI 与土壤湿度的回归方程,提出了西南地区 NDDI 干旱等级划分标准。本文基于该标准,结合中华人民共和国水利部的《旱情等级标准》<sup>[19]</sup> 根据云南省实际情况,增加了“特旱”等级。由此得到,云南省干旱等级划分标准如表 1 所示。

## 3 结果及分析

**3.1 云南春旱年际变化** 运用云南省内 34 个气象站点的月降水量,计算 2004—2013 年 1—6 月的月平均降水量,得到图 1。从整体上来看,研究期间

表 1 云南省干旱等级划分

Tab.1 Table of drought classification in Yunnan Province

干旱等级	土壤相对湿度 $W/\%$	NDDI
湿润	$W > 80$	$NDDI < 0.1275$
正常	$60 < W \leq 80$	$0.1275 < NDDI \leq 0.4175$
轻旱	$50 < W \leq 60$	$0.4175 \leq NDDI < 0.5265$
中旱	$40 < W \leq 50$	$0.5265 \leq NDDI < 0.7075$
重旱	$30 < W \leq 40$	$0.7075 \leq NDDI < 0.8525$
特旱	$W \leq 30$	$NDDI \geq 0.8525$

内云南省 34 个气象站点的降水量呈减少态势。其中,2004、2008 年和 2007 年的月均降水量较高,2012 及 2013 年则较低;尤其 2013 年,降水量几乎仅为 10 年前的三分之二。而降水量标准差唯有 2010 年独高,说明与其他年份相比,2010 年降水分布极其不均。

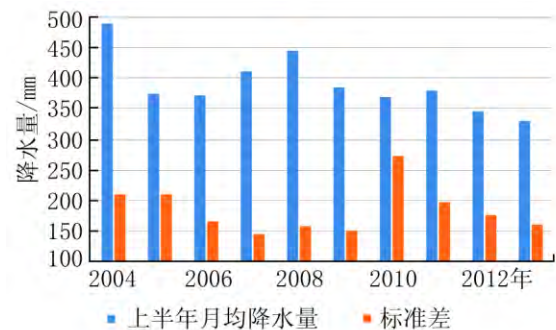


图 1 云南省 2004—2013 年(上半年)月均降水量与标准差

Fig.1 Monthly average precipitation and the standard deviation of Yunnan Province in the first-half of 2004 to 2013

根据云南省 2004—2013 年(上半年)的 MODIS 8 日遥感卫星影像,计算得到云南省 2004—2013 年平均归一化干旱指数 NDDI,如图 2。其中,2004—2013 年 NDDI(上半年)均值呈先下降、后平稳、后又剧烈起伏的变化。可知研究期内,云南省春旱反复发生,而此期间的标准差则持续呈升降交替变化,并有增大的趋势,表明 10 年间旱情的空间差异增大。图 2 所示,2010 年及 2013 年的 NDDI(上半年)均值较高,说明这几年较其他年份春旱更严重;2008 年及 2011 年却反之。这与云南省降水情况有密不可分的联系(如图 1)。同时,2005、2010 年

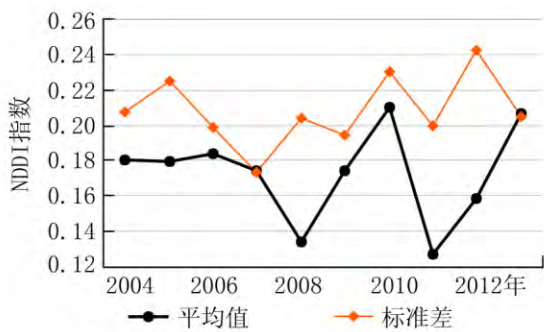


图 2 云南省 2004—2013 年(上半年) NDDI 平均值与标准差

Fig.2 The average NDDI and the standard deviation of Yunnan Province in the first-half of 2004 to 2013

和 2012 年的标准差较高,说明与其他年份相比,这几年旱情的空间差异更大;而 2007 年的空间差异较小,这可能与 2007 年降水分布较均匀有关(图 1)。

此外, NDDI 值较高,标准差也较高的年份为 2010 年,说明 2010 年不仅春旱严重,空间差异也很大,这与 2010 年的降水情况相符;双低值出现在 2011 年,说明 2011 年春旱得到了缓解,可能的原因是 2011 年降水量的增加。

3.2 云南春旱空间分布 根据图 3 中 10 年(上半年) NDDI 均值的空间分布可发现,云南省东部、北部旱情严重,西南部较轻微。旱情较严重的区域主要分布于北部及东北部,包括丽江市、大理白族自

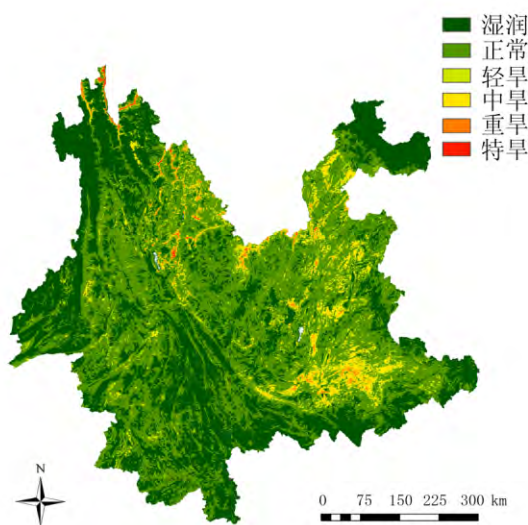


图 3 云南省 2004—2013 年(上半年) 平均旱情等级分布图

Fig.3 The distribution of average drought level of Yunnan Province in the first-half of 2004 to 2013

治州(以下简称大理州)、楚雄彝族自治州(以下简称楚雄州)、昆明市、昭通市、曲靖市等 6 个市/自治州;以及东南部的红河哈尼族彝族自治州(以下简称红河州)、文山壮族苗族自治州(以下简称文山州)的中部地区。

云南省常年湿润区域主要为怒江傈僳族自治州(以下简称怒江州)北部,迪庆藏族自治州(以下简称迪庆州)中部部分地区,昭通市东北部,德宏傣族景颇族自治州(以下简称德宏州)与保山市西部的部分地区,普洱市中南部的部分地区,以及红河州、文山州和西双版纳傣族自治州(以下简称西双版纳州)东南部的部分地区。

对比图 3 与图 4 中 2012 年云南省的土地覆盖类型(8 类)分布可发现,经常发生旱情的是草原与耕地等类型所在的地区。由此可推测,易发生干旱的植被类型为草原和耕地。

本文利用冷热点分析识别 NDDI 的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类(图 5),从而分析 2004—2013 年云南省 NDDI 空间集聚特征。NDDI 高值区域主要集中于 3 个区域:①丽江市除宁蒗彝族自治县以外地区,大理州宾川县,楚雄州北部 5 个县,昆明市西北 2 个县及昭通市西南 2 个县;②红河州 7 个县,文山州西部 4 个县和南部的麻栗坡县及玉溪市东西部各 1 个县;③临沧市西部 3 个县,保山市东部 2 个县;此外,曲靖市也有 3 个县为

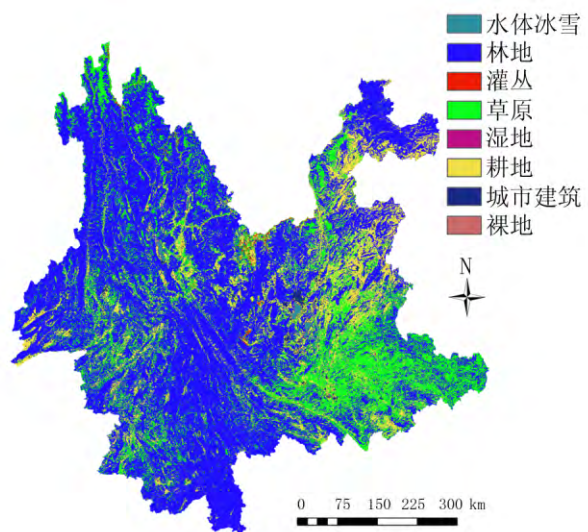


图 4 云南省 2012 年土地覆盖类型图

Fig.4 Land cover of Yunnan Province in the year of 2012

重旱集中区. NDDI 低值区域也主要集中在 2 个区域: ①云南省西北部 9 个县; ②昭通市东北部 8 个县; 此外, 低值集中县还包括普洱市 3 个县, 大理州东南部 2 个县, 临沧市双江拉祜族佤族布朗族傣族自治县, 西双版纳州勐海县, 昆明市晋宁县和玉溪市澄江县.

3.3 云南春旱时空演变 为分析云南省 2004—2013 年的 NDDI 变化趋势, 本文运用趋势线法来计算斜率, 并根据自然断点分级法分为明显缓和 (-0.137 7 ~ -0.022 6)、中度缓和 (-0.022 6 ~ -0.011 4)、轻度缓和 (-0.011 4 ~ -0.003 5)、基本不变 (-0.003 5 ~ 0.003 2)、轻度加剧 (0.003 2 ~ 0.013 2)、中度加剧 (0.013 2 ~ 0.028 0)、严重加剧 (0.028 9 ~ 0.147 4) 7 类, 如图 6. 整体上, 10 年间旱情加剧的地区主要分布于云南北部, 南部则有普遍缓和的趋势. 其中, 文山州东部以及普洱市等其他西南 6 市也有少量区域旱情明显缓和. 旱情严重加剧的区域主要在迪庆州东部、北部, 丽江市北部, 大理州祥云县, 昆明市呈贡区, 曲靖市大部分地区, 红

河州东北部. 维持基本不变的区域较为零散, 较集中地分布在楚雄州和普洱市北部. 未来的防旱抗旱工作可在监控云南省全境的同时, 着重关注 2004—2013 年旱情加剧的地区.

根据云南省不同地区 10 年间旱情变化, 可归纳云南省重旱区、常旱区、常旱市及变化点(表 2), 为政府相关部门在未来几年更科学有效地监测旱情、继续做好干旱预防监测工作提供参考.(其中, 迪庆州北部区域被 NDDI 指数划分为旱区, 可能与该地区海拔高有积雪有关; 而昆明市市辖区、保山市市辖区、昭通市市辖区被 NDDI 指数划分为旱区, 可能与其为建筑物覆盖地表有关, 因此都被排除在外.)

#### 4 结论与讨论

干旱的成因与影响十分复杂, 要有效应对干旱, 就必须及时准确地了解旱情. 本文运用云南省 2004—2013 年年(上半年)的 MODIS 陆地产品中的地表反射率产品计算了归一化干旱指数 NDDI,

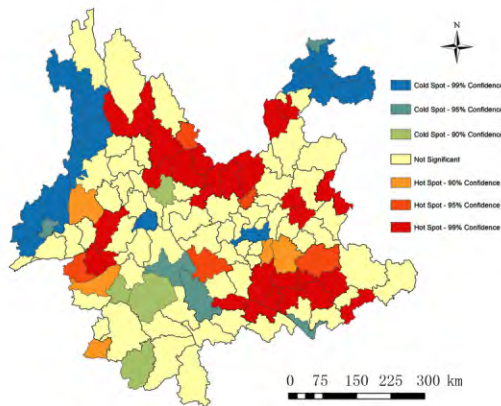


图 5 云南省 2004—2013 年(上半年) NDDI 值冷热点识别

Fig.5 Cold/hot spot identification of NDDI during the first-half of 2004 to 2013 of Yunnan Province

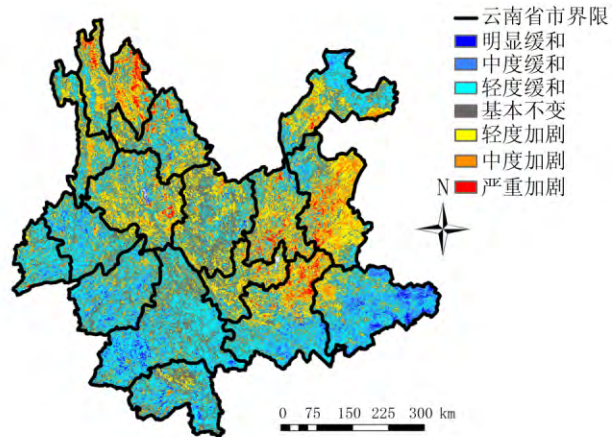


图 6 云南省 2004—2013 年(上半年) NDDI 变化趋势图

Fig.6 The trend of NDDI changes during the first-half of 2004 to 2013 in Yunnan Province

表 2 云南省干旱区/点划分

Tab.2 Table of areas of frequent drought in Yunnan Province

分类	区/点				
重旱区	大理州宾川县	楚雄州元谋县	红河州建水县	文山州砚山县	昭通市西南部
常旱区	迪庆州北部	大理州中部	昆明市部分地区	曲靖市中西部	红河州的中东部 文山州的西部
常旱市	丽江市				
变化点	曲靖市	大理州祥云县	昆明市呈贡区		

并提出针对云南省的 NDDI 干旱等级划分标准,对云南省 2004—2013 年的春旱时空差异特征进行了分析研究.主要结论包括:

(1) 2004—2013 年,云南省年均降水量急剧减少,春旱反复发生,旱情有加重趋势,其空间差异也逐渐增大.其中,2013 年降水量比 2004 年几乎减少了三分之一;2010、2013 年旱情较为严重;尤其是 2010 年,降水分布极其不均,旱情空间差异大.归一化干旱指数 NDDI 所显示的旱情分布、变化情况和云南省降水情况相符,说明 NDDI 用于评估云南省干旱情况具有可行性.

(2) 云南省东部、北部旱情严重,西南部较轻微.2004—2013 年春旱发生的热点区主要集中于中北部楚雄州、东南部的红河州、文山州等部分地区;冷点区主要集中于西北部的昭通市东北部的少数地区.而丽江市每年的旱情几乎相似.此外,云南省易旱植被类型主要为草原和耕地.

(3) 10 年间,云南省总体呈旱情加重的趋势,但北部地区旱情严重加剧,南部则相对有所缓解.其中,严重加剧情况主要分布于东部、西北部;基本不变的区域较为零散;文山州东部以及普洱市等少量区域的旱情明显缓和.

此外,本文总结并划分了云南省重旱区、常旱区、常旱市及变化点,为政府相关部门监测、预防、应对旱灾提供依据.例如在根据经验得出的常旱地区、多旱点,设置卡车固定供水点,或修建蓄水池,并结合不同地区的干旱发生时间与严重程度合理分配水资源.

相较于其他自然灾害的突发性与爆发性,干旱具有一定的时间空间可比性,有规律可循.我们可从历史记录中推演规律获取经验,辅助预测与决策.本文研究 2004—2013 年云南省春旱的时空变化特征,验证了归一化干旱指数 NDDI 在云南省的适用性;分析了旱情的分布差异与变化,为政府部门进行抗旱、防旱、减灾及灾后工作提供有效依据.

## 参考文献:

- [1] HORION S, CARRAO H, SINGLETON A, et al. JRC experience on the development of drought information systems [M]. Luxembourg: Technical Report, 2012, 1: 7-8. doi: 10.2788/15761.
- [2] HEIM R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. Bull Amer Meteor

Soc, 2002( 83): 1 149-1 165.

- [3] 郑远长. 全球自然灾害概述 [J]. 中国减灾, 2000, 10( 1): 14-19.  
ZHENG Y C. Overview of global natural disasters [J]. China Disaster Reduction, 2000, 10( 1): 14-19.
- [4] 宋连春, 邓振镛, 董安祥, 等. 干旱 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.  
SONG L C, DENG Z Y, DONG A X, et al. Drought [M]. Beijing: Meteorological Press, 2003.
- [5] WATSON K, ROWEN L C, OFFIELD T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images [J]. Remote Sensing of Environment, 1971( 3): 2 017-2 041.
- [6] 曾燕, 邱新法, 徐萌, 等. 2004 年秋季江苏省干旱遥感监测研究 [J]. 气象科学, 2007, 27( 3): 302-306.  
ZENG Y, QIU X F, XU M, et al. Remote sensing monitoring of drought in autumn of 2004 in Jiangsu Province [J]. Meteorological Science, 2007, 27( 3): 302-306.
- [7] 李星敏, 刘安麟, 张树誉, 等. 热惯量法在干旱遥感监测中的应用研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23( 1): 54-59.  
LI X M, LIU A L, ZHANG S Y, et al. Application of thermal inertia method in remote sensing drought monitoring [J]. Agricultural Research In Arid Areas, 2005, 23( 1): 54-59.
- [8] ENGLAND A W, GALANTOWICZ J F, SCHRETTER M S. The radio-brightness thermal inertia measure of soil moisture [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30( 1): 132-139.
- [9] CASHION J, LAKSHMI V, BOSCH D, et al. Microwave remote sensing of soil moisture evaluation of the TRMM microwave imager ( TMI ) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia [J]. Journal of Hydrology, 2005( 307): 242-253.
- [10] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述 [J]. 遥感技术与应用, 2007, 22( 3): 466-469.  
MAO K B, TANG H J, ZHOU Q B, et al. Overview of research of passive microwave remote sensing of soil moisture inversion [J]. RS Technology and Application, 2007, 22( 3): 466-469.
- [11] 杨世琦, 高阳华, 易佳. 干旱遥感检测方法研究进展 [J]. 高原山地气象研究, 2010, 30( 2): 207-209.  
YANG S Q, GAO Y H, YI J. Research Progress on drought remote sensing detection method [J]. Mountain Plateau Meteorological Research, 2010, 30( 2): 207-209.

- [12] 刘欢,刘荣高,刘世阳.干旱遥感监测方法及其应用发展[J].地球信息科学学报,2012,14(2):232-238.  
LIU H,LIU R G,LIU S Y.Drought monitoring by remote sensing and its application development [J].Journal of Earth Information Science,2012,14(2):232-238.
- [13] GU Y X,BROWN J F,VERDIN J P,et al.A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States [J].Geophysical Research Letters,2007,34(6):L06407.
- [14] 云南省人民政府门户网站[Z/OL].[http://www.yn.gov.cn/yn\\_shouye/index.html](http://www.yn.gov.cn/yn_shouye/index.html).2012-01-16.  
Portal site of the government of Yunnan Province [Z/OL].[http://www.yn.gov.cn/yn\\_shouye/index.html](http://www.yn.gov.cn/yn_shouye/index.html).2012-01-16.
- [15] 世界气象组织网站.IPCC 4th Assessment Report, WG 1 Glossary [Z/OL].<http://wmo.multicorpora.net/MultiTransWeb/Web.mvc.2002>.  
Website of world meteorological organization.IPCC 4th Assessment Report, WG 1 Glossary [Z/OL].<http://wmo.multicorpora.net/MultiTransWeb/Web.mvc.2002>.
- [16] 云南省民政厅 [Z/OL].<http://yunnan.mca.gov.cn/2009-02-10>.  
Civil Affairs Bureau of Yunnan Province [Z/OL].<http://yunnan.mca.gov.cn/2009-02-10>.
- [17] 臧海佳,王燕,李占清.美国对地观测系统卫星资料产品及服务[M].北京:气象出版社,2011.  
ZANG H J,WANG Y,LI Z Q.American systems for earth observation satellite data products and services [M].Beijing: Meteorological Press,2011.
- [18] 白开旭,刘朝顺,施润和,等.2010年中国西南旱情的时空特征分析——基于MODIS数据归一化干旱指数[J].地球信息科学学报,2012,14(1):32-48.  
BAI K X,LIU C S,SHI R H,et al.Analysis of spatial and temporal characteristics of the 2010 Chinese South-west drought drought index—Based on the normalized MODIS data [J].Journal of Earth Information Science,2012,14(1):32-48.
- [19] 中华人民共和国水利部.旱情等级标准 SL424—2008 [S].北京:中国水利水电出版社,2009.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China.Standard of drought grade SL424—2008 [S].Beijing: China Waterpower Press,2009.

## On spatial-temporal analysis of drought in Yunnan Province from 2004 to 2013

WU Jian-sheng<sup>1,2</sup>, REN Yi-wei<sup>1</sup>, ZHANG Xi-wen<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning & Design, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2.College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Since the twenty-first Century, the frequent occurrence of drought in Yunnan Province has exerted a serious impact on human activities and natural environment. This paper has tried to use MODIS remote sensing data based on Normalized Difference Drought Index to analyze the temporal and spatial variation characteristics of drought in Yunnan Province from 2004 to 2013, aiming at more scientific control and prevention of drought. The results show that during the study period, spring drought in Yunnan Province has occurred repeatedly, presenting increasing spatial variability. The droughts that occurred in 2010 and 2013 are the most serious. Drought in eastern and northern part of Yunnan Province was severe kind, while that in southwest was slight. High value areas of ND-DI appear in the southeastern and central north, while low value areas in the northwest and northeast. During recent 10 years, drought has aggravated in northern Yunnan, and mitigated in southern Yunnan.

**Key words:** drought; Normalized Difference Drought Index; Yunnan Province; spatial-temporal analysis