

# 干旱过程对耕地自然生产功能的影响

赵媛媛<sup>1,2</sup>, 何春阳<sup>1,2\*</sup>, 姚辉<sup>3</sup>, 黄庆旭<sup>1</sup>, 杨洋<sup>1,2</sup>

(1. 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875;  
3. 山东菏泽市建设局, 菏泽 274000)

**摘要:** 客观评估干旱过程对耕地自然生产功能的影响有利于耕地保护中的科学决策。该文评价了干旱过程对北京耕地自然生产功能的影响。首先利用地表湿润指数来表征地表干湿程度, 经 Mann-Kendall 方法检验出 1951—2006 年北京典型的干旱过程; 其次利用气象数据和桑斯维特纪念模型计算了干旱过程起始和中止年份的自然生产潜力; 最后分析了干旱过程对耕地自然生产潜力的影响。主要结论如下: 1951—2006 年, 北京总体呈变干趋势, 1979—1984 年和 1998—2006 年干旱过程比较明显; 1979、1984、1998 和 2006 年北京平均自然生产潜力分别约为 1 043、912、1 085 和 872 g/(m<sup>2</sup>·a), 其中通州区的单位自然生产潜力最大, 延庆最小; 干旱过程对耕地自然生产潜力影响较大, 自然生产潜力总量减少量在 1979—1984 年超过了 10%, 到 1998—2006 年即将达到 20%。因此, 在耕地管理过程中, 不仅要注重耕地的数量和分布, 还要考虑气候波动尤其是干旱过程对耕地生产功能的影响。

**关键词:** 干旱, 生产力, 模型, 地表湿润指数, 北京, Mann-Kendall 检验

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.049

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0278-07

赵媛媛, 何春阳, 姚辉, 等. 干旱过程对耕地自然生产功能的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 278—284.

Zhao Yuanyuan, He Chunyang, Yao Hui, et al. Effect of drought process on natural production function of cultivated land[J].

Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 278—284. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

干旱是最严重的自然灾害之一, 20 世纪 90 年代以来, 北方干旱化造成的直接经济损失每年在 1 000 亿元以上<sup>[1]</sup>。北方地区人口总量及密度的迅速增加、工业发展、城市扩张、消费水平不断提高以及对水土资源过度和不合理的利用, 又进一步加剧了干旱化的发展趋势。在华北和东北地区, 干旱一直是困扰当地水资源供给的一个关键因素, 它制约着商品粮基地的发展和老工业基地的振兴<sup>[1]</sup>, 而且干旱有可能产生灾害链, 导致农作物旱灾, 粮食欠收, 引发粮荒(饥荒)、粮食加工企业损失、国际粮食贸易损失等<sup>[2]</sup>。马柱国、任小波等对中国 1951—2006 年气候要素的变化及其与干旱化联系的事实进行了分析, 结果表明, 西北东部、华北及东北地区降水减少明显, 气温基本为上升趋势, 西北东部、华北、东北及西南地区当前正处于一个干旱化过程<sup>[3]</sup>。

耕地是农业生态系统的载体<sup>[4]</sup>, 是非常重要的土地资源, 其基础功能是生产功能, 即为人类生存和生产提供食物和原料<sup>[5]</sup>。土地自然生产潜力是表征耕地自然生产功

能的常用指标。它是假设在其他条件充分满足的情况下, 光、温、水等气候资源及土壤的自然肥力能完全转化为物质时土地的产量<sup>[6]</sup>。目前已开展了不少关于土地生产潜力的研究<sup>[7-9]</sup>, 为土地生产功能的评价奠定了良好的基础。中国粮食生产在很大程度上依赖于农业气候资源状况, 粮食生产的空间格局分布与产量的年际波动无不深受气候资源的影响<sup>[10]</sup>。赵昕奕等指出从 20 世纪 60 年代至今的 40 多年里, 伴随较大的年际变率, 中国北方农牧交错带中段平均气温升高, 降水量减少, 土地生产潜力相应地产生阶段性和年际的变化, 气温、降水的综合作用使研究区绝大部分农牧业土地自然生产潜力呈减少趋势<sup>[6]</sup>。高志强等的研究指出区域净初级生产力的变化受温度和降水的影响显著, 中国北方 20 a 来温度显著增加, 降水明显减少, 净初级生产力以减少趋势为主<sup>[11]</sup>。因此, 在北方干旱化背景下, 研究干旱过程对耕地自然生产潜力的影响对于耕地保护进而保障粮食安全具有重要意义。

耕地资源是维系北京市社会经济稳定和持续发展极为重要的战略资源<sup>[12]</sup>, 其生产功能有力地保障了区域人口及产业对于农产品的需求<sup>[13]</sup>。近年来, 北京快速的城市化过程使耕地面积大量减少, 与此同时, 随着干旱化的加剧, 北京耕地功能转变以及生产潜力变化等问题更加突出。田志会等结合桑斯维特纪念模型和迈阿密模型估算了北京山区的土地生产潜力, 结果表明北京山区植物气候生产力总体分布趋势由东向西递减, 水分条件是植物气候生产力的主要限制因子<sup>[14-15]</sup>。但目前对于土地生产潜力方面的研究主要集中在土地利用变化或气候变化对其产生的影响, 而针对干旱过程对耕地自然生产功

收稿日期: 2008-10-13 修订日期: 2009-01-13

资助项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目“北京城市扩展情景模拟”; 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB400505)。

作者简介: 赵媛媛(1985—), 女, 山东人, 博士生, 主要从事遥感应用与土地资源管理研究。北京 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 100875。Email: yuanyuan0402@ires.cn

\*通信作者: 何春阳, 博士, 副教授。北京 北京师范大学资源学院, 100875。Email: hcy@bnu.edu.cn

能影响的研究还比较薄弱。因此, 本文选择北京为研究区, 利用地表湿润指数分析北京 1951—2006 年的干湿变化情况, 找出典型的干旱过程; 然后利用桑斯维特纪念模型计算耕地的自然生产潜力; 最后分析干旱过程中耕地自然生产潜力的变化, 从而探究干旱过程对耕地自然生产功能的影响, 为耕地保护决策提供科学依据。

## 1 研究区概况和数据来源

研究区北京位于北纬  $39^{\circ}56'$ 、东经  $116^{\circ}20'$ , 面积约  $16\,352\text{ km}^2$  (图 1)。其中, 山区约占全市土地总面积的  $2/3$ , 为研究方便, 本文所指山区包含了所有山地面积超过辖区总面积一半以上的区县, 即房山、延庆、密云、怀柔、昌平、平谷、门头沟等, 总面积  $10\,400\text{ km}^2$  [16]。研究区属暖温带半湿润气候区, 年平均气温  $11.8^{\circ}\text{C}$ , 年平均降雨量  $638.8\text{ mm}$ , 无霜期  $195\text{ d}$  [17]。

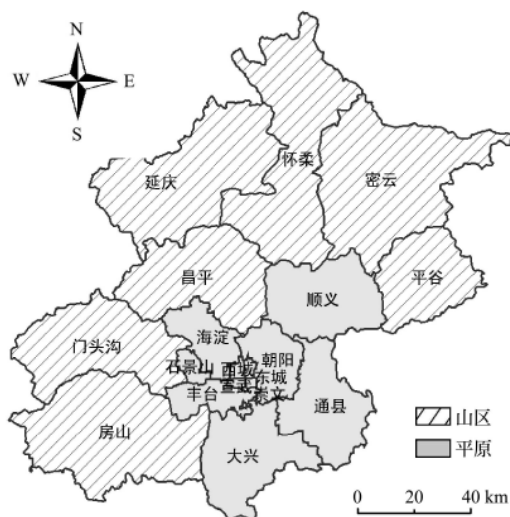


图 1 研究区  
Fig.1 Study area

使用的数据主要包括:

1) 气象数据。本文使用的气象数据来源于中国气象局, 时段为 1951 年 1 月至 2006 年 12 月, 数据内容为站点的经、纬度, 地面月平均温度及月平均降雨量。

2) 土地利用数据。本文的土地利用数据为 Landsat TM/ETM+影像生成的 1991、1997、2000 和 2004 年 4 期土地利用图。土地利用类型划分为: 建设用地、水域、耕地、灌草地、林地 5 大类 [18]。为排除耕地面积及布局变化对耕地自然生产潜力的影响, 本文假定 1991、1997、2000 和 2004 年未变化的耕地为 1951—2006 年一直未变化的耕地, 定义该部分耕地的自然生产潜力变化是由干旱过程引起的。

## 2 研究方法

### 2.1 干旱过程检测

#### 2.1.1 地表湿润指数计算方法

目前比较常用的综合类的干旱化指标有帕尔默干旱指数 (PDSI) [19]、标准化降水指数 (SPI) [20] 和地表湿润指数 (SWI) [21]。其中, PDSI 在干旱的量化准确度上比

较高, 具有很高的可信度, 但是具体计算的复杂程度也高, 不利于快速进行干旱程度的评价; SPI 假定了所有地点旱涝发生概率相同, 无法标识频发地区, 而且没有考虑水分的支出。

基于这些考虑, 本文采用了 1 个计算简便, 既考虑降水, 又考虑温度变化对潜在蒸发影响的指数——地表湿润指数来分析研究区的干旱化趋势。长时间序列中, 地表湿润指数变小, 表明具有干旱趋势。地表湿润指数 [21] 可以表示为

$$H = \frac{P}{P_e} \quad (1)$$

式中:  $H$ ——地表湿润指数;  $P$ ——年降水总量, mm;  $P_e$ ——年潜在蒸发总量, mm。降水量为观测值, 月潜在蒸发量  $P_{ei}$  为根据桑斯维特改进的月潜在最大蒸发量, 计算方法为

$$P_e = \sum_{i=1}^{12} P_{ei} \quad (2)$$

$$P_{ei} = \begin{cases} 0 & T_i \leq 1^{\circ}\text{C} \\ 1.6d\left(\frac{10T_i}{I}\right)^a \times 10 & 1^{\circ}\text{C} < T_i < 26.5^{\circ}\text{C} \\ a_1 + a_2T_i + a_3T_i^2 & T_i \geq 26.5^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $d$ ——每月的天数除以 30 (12 个月均除以 30), 当月天数为 28 或 29 天时,  $d$  小于 1, 当月天数为 31 时,  $d$  大于 1;  $a=0.49239+1.792 \times 10^{-2}R-7.71 \times 10^{-5}R^2+6.75 \times$

$10^{-7}R^3$ ;  $R = \sum_{i=1}^{12} r$  为月总加热指数,  $r = \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$  为月平均

加热指数;  $T_i$ ——第  $i$  个月的月平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a_1=-415.8547$ ,  $a_2=32.2441$ ,  $a_3=-0.4325$ 。

#### 2.1.2 干旱趋势检验方法

干旱趋势的检验方法选择了 Mann-Kendall 方法 (简称 M-K 法)。此法由 Mann [22] 于 1945 年发展而来, 当时并非用于检测气候突变, 而仅用于检测序列的一种变化趋势, Sneyers [23-24] 则进一步完善了这种方法, 它能大体上测定各种变化趋势的起始位置。Goossens [25] 等把这一方法应用到反序列中, 从而发展了一种能检测气候突变的新方法, 它以检测范围宽、定量化程度高而被广泛应用。

M-K 方法以气候序列平稳为前提, 并且该序列是随机独立的, 其概率分布等同。

在原假设  $H_0$ : 气候序列没有变化的情况下, 设此气候序列为  $x_1, x_2, \dots, x_N$ ,  $m_q$  表示某一元素  $x_q$  大于前面要素  $x_{q-1}, \dots, x_1$  的累积数,  $N$  为样本数, 定义一统计量

$$d_k = \sum_{q=1}^k m_q \quad (2 \leq k \leq N) \quad (4)$$

而新建序列  $d_2, \dots, d_N$  的均值和方差可计为

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \quad \text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq N) \quad (5)$$

将新建序列  $d_k$  标准化得

$$U(d_k) = \frac{[d_k - E(d_k)]}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} \quad (6)$$

式中  $U(d_k)$  为标准分布, 若概率分布为  $a_1 = \text{prob}(|U| > |U(d_k)|)$ , 给定显著水平  $a_0$ , 当  $a_1 \geq a_0$  时, 原假设成立; 当  $a_1 < a_0$  时, 则原假设不成立, 说明该要素存在明显的变化趋势。标准化的新序列  $U(d_k)$  将组成一条新的时间变化曲线  $c_1$  (图 2), 如果该曲线落在置信区间内, 那么原序列不存在变化趋势, 反之, 原序列存在显著的变化趋势。参考相关研究, 本文选取置信区间  $|U| \leq 1.96$  (95% 的信度水平), 如果曲线 ( $U(d_k)$  值) 落在  $|U| \leq 1.96$  之外, 说明存在明显变化趋势,  $U(d_k)$  为正值表示增大趋势, 反之则为减小趋势, 否则, 不存在显著变化趋势。

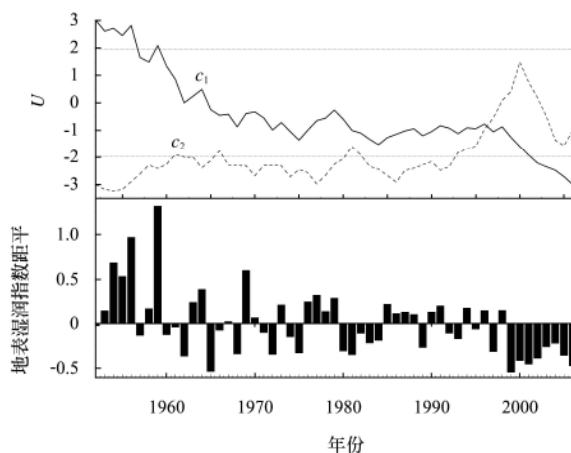


图 2 1951—2006 年北京地表湿润指数距平及 Mann-Kendall 法计算值

Fig.2 Anomaly of surface wetting index and Mann-Kendall trend in Beijing from 1951 to 2006

把此方法引用到反序列中,  $\bar{m}_q$  表示第  $q$  个样本  $x_q$  大于  $x_w$  ( $q \leq w \leq N$ ) 的累计数, 当  $q' = N + 1 - q$  时, 如果  $\bar{m}_q = m_{q'}$ , 则反序列的  $\bar{U}(d_q)$  由下式给出

$$\begin{cases} U(d_q) = -U(d_{q'}) \\ q' = N + 1 - q \quad (q, q' = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (7)$$

$\bar{U}(d_q)$  在图中以  $c_2$  (图 2) 表示。

当曲线  $c_1$  超过信度线, 即表示存在明显的变化趋势时, 如果曲线  $c_1$  和  $c_2$  的交叉点位于信度线之间, 这点便是突变点的开始<sup>[26-27]</sup>。

本文利用 M-K 方法检验了地表湿润指数的变化趋势并结合地表湿润指数的平均距平来识别 1951—2006 年北京干旱过程 (图 2)。

## 2.2 计算耕地自然生产潜力

目前的研究中, 土地自然生产潜力的计算主要有 3 种方法: 理论计算法、高产地块法和经验公式法<sup>[28]</sup>。理论计算法是基于光合作用过程、生理生态特征和外界环境因子来模拟作物生长过程, 进而计算生产潜力的方法, 该方法计算复杂, 所需参数较多, 如黄秉维光合潜力公式<sup>[29]</sup>、CERES 模型<sup>[30-31]</sup>、EPIC 模型<sup>[32-33]</sup>和光温阶乘模型

等; 高产地块法是计算土地生产潜力的一种简便易行的方法, 尤其适合在县级规划中应用, 由于需要对研究区的高产地块进行调查, 该方法的推广性和可比性较差; 经验公式法是通过统计某种因子与产量的关系而得到的, 其中比较著名的有迈阿密模型 (Miami model)<sup>[34]</sup>和桑斯维特纪念模型 (Thornthwaite Memorial model)。

参考相关研究<sup>[14-15]</sup>, 并结合本研究数据情况, 本文将桑斯维特纪念模型计算所得的生产潜力代表耕地的自然生产潜力。桑斯维特纪念模型是 Lieth 根据世界五大洲 50 个地点的净第一性生产力资料和桑斯维特可能蒸散模型, 采用最小二乘法建立的, 计算简便; 同时, 该模型中的蒸发量受太阳辐射、温度、降水、饱和差、气压和风速等一系列气候因素的影响, 包含的因子较全面, 因而对植物净第一性生产力的估算较为合理<sup>[35]</sup>。模型具体表示如下<sup>[36]</sup>

$$TSP(v) = 3000[1 - e^{-0.0009695(v-20)}] \quad (8)$$

式中:  $TSP(v)$ ——以年平均蒸散量为自变量计算出的植物干物质总量,  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;  $v$ ——年平均实际蒸散量,  $\text{mm}$ 。年平均实际蒸散量可由式 (9) 计算得出

$$v = \frac{1.05P}{\sqrt{1 + (1.05P/l)^2}} \quad (9)$$

式中:  $l$ ——年平均最大蒸散量, 可由式 (10) 计算

$$l = 300 + 25t + 0.05t^3 \quad (10)$$

式中:  $t$ ——年平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

本文利用年平均温度和降雨量数据经过克里格 (Kriging) 插值<sup>[37]</sup>来计算未变化耕地的自然生产潜力 (图 3), 栅格大小和投影与土地利用数据一致。

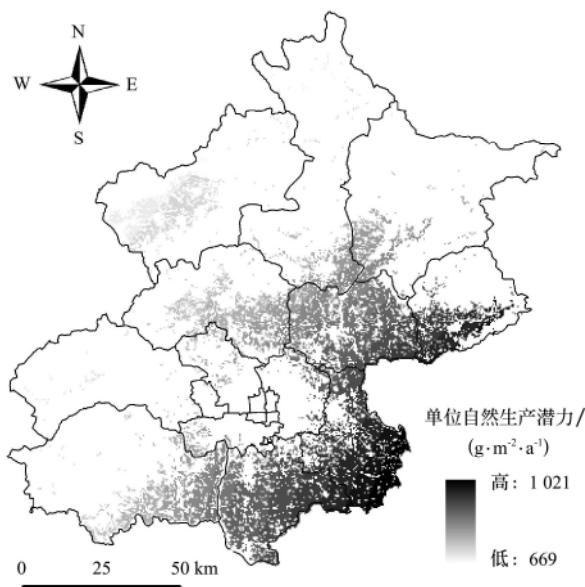


图 3 1984 年北京未变化耕地的自然生产潜力分布

Fig.3 Natural potential productivity distribution of non-changed cultivated land of Beijing in 1984

## 2.3 干旱过程对北京耕地自然生产潜力影响评价

本文中, 干旱过程对耕地自然生产潜力的影响主要从两个方面来量化, 一方面是单位土地面积上的自然生

产潜力（单位自然生产潜力）变化，另一方面为区域耕地自然生产潜力总量（自然生产潜力总量）变化。两者分别采用式（11）和式（12）计算

$$\Delta tsp = tsp_{T_2} - tsp_{T_1} \quad (11)$$

式中： $\Delta tsp$ ——单位自然生产潜力变化量， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ； $tsp_{T_1}$ 、 $tsp_{T_2}$ —— $T_1$ 和 $T_2$ 时间耕地的单位自然生产潜力， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

$$\Delta T_{tsp} = \sum_{j=1}^n \Delta tsp_j \quad (12)$$

式中： $\Delta T_{tsp}$ ——区域耕地自然生产潜力变化总量， $10^4 \text{ t}$ ； $n$ ——区域耕地单元数量。

为了更进一步揭示干旱过程对耕地自然生产潜力的影响强度，本文借助地表湿润指数定义了干旱对生产潜力的影响强度指数（式（13）），以表示每变化 1 单位地表湿润指数带来的自然生产潜力总量的变化。

$$S = |\Delta T_{tsp} / \Delta h| \quad (13)$$

式中： $S$ ——干旱对耕地自然生产潜力的影响强度， $10^4 \text{ t}$ ； $\Delta h$ ——地表湿润指数变化。

### 3 结果与分析

#### 3.1 北京干旱趋势

图 2 显示了 1951—2006 年地表湿润指数距平及 M-K 法计算值的变化。通过 M-K 法检验结果来看，地表湿润指数总体表现为逐年下降趋势。1951—1975 年，地表湿润指数轻微波动下降；以 1975 年为转折点，到 1979 年地表湿润指数达到小高峰后，1979—1984 年又有所回落，表现出明显的干旱过程；1984—1996 年，地表湿润指数又呈轻微波动趋势；1996 年为突变点，这之后直到 2006 年地表湿润指数显著降低。从地表湿润指数距平的变化来看，1952—1959 年，地表湿润指数距平大多为正值；1960—1975 年距平呈正负波动趋势；1976—1979 年，距平表现为正，经历一个湿润阶段；以 1979 年为转折点，之后 1980—1984 年，连续 5 a 为负距平，为明显的干旱时段；之后距平又表现为正负波动，但正距平年份较多，以 1998 年为转折点，1999—2006 年距平全部为负值，为另一个明显的干旱时段。

可见，M-K 检验和地表湿润指数距平对于北京干湿变化的判断大体一致。考虑到干旱过程的典型性和明确性，本文选取 1979—1984 年和 1998—2006 年为北京干旱过程的典型代表，进而分析干旱过程对耕地自然生产潜力的影响。

#### 3.2 北京耕地自然生产潜力特征

表 1 显示了 1979、1984、1998 和 2006 年北京未变化耕地的自然生产潜力数量特征。1979、1984、1998 和 2006 年北京平均自然生产潜力分别约为 1 043、912、1 085 和 872  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，潜力总量分别约为  $368.87 \times 10^4$ 、 $322.59 \times 10^4$ 、 $383.72 \times 10^4$  和  $308.30 \times 10^4 \text{ t}$ 。

图 3 显示了 1984 年北京未变化耕地的自然生产潜力分布特征，其他年份的特征与此类似。总体上看，平原区耕地的自然生产潜力较山区大，单位自然生产潜力最

高的耕地分布在通州，并以通州为中心呈辐射状减小，延庆县耕地的单位自然生产潜力最小。

表 1 1979、1984、1998 和 2006 年北京未变化耕地的自然生产潜力

Table 1 Natural potential productivity of non-changed cultivated land in Beijing from 1979 to 2006

年份	单位自然生产潜力/ $(\text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1})$			自然生产潜力总量/ $10^4 \text{ t}$
	最大值	最小值	平均值	
1979	1 092	853	1 043	368.87
1984	1 021	669	912	322.59
1998	1 146	934	1 085	383.72
2006	903	806	872	308.30

#### 3.3 干旱过程对北京耕地自然生产潜力的影响

干旱过程对北京全区、山区和平原区耕地自然生产潜力的影响见图 4。1979—1984 年，北京全区温度升高了  $0.33^\circ\text{C}$ ，年降水量减少了 203 mm，地表湿润指数减小了 0.22。在此干旱过程影响下，耕地单位自然生产潜力减少了 131  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；自然生产潜力总量减少了  $46.28 \times 10^4 \text{ t}$ ，减少率为 12.55%；平均每降低 1 单位地表湿润指数会使自然生产潜力总量减少  $210.36 \times 10^4 \text{ t}$ 。1998—2006 年，北京全区温度降低了  $0.26^\circ\text{C}$ ，年降水量减少了 187 mm，地表湿润指数减小了 0.44。在此干旱过程影响下，耕地单位自然生产潜力减少了 213  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；自然生产潜力总量减少了  $75.42 \times 10^4 \text{ t}$ ，减少率为 19.66%；平均每降低 1 单位地表湿润指数会使自然生产潜力总量减少  $171.41 \times 10^4 \text{ t}$ 。

1979—1984 年，北京山区和平原区温度分别升高了  $0.27^\circ\text{C}$  和  $0.46^\circ\text{C}$ ，年降水量分别减少了 210 和 185 mm，地表湿润指数分别减少了 0.25 和 0.20。在此影响下，耕地单位自然生产潜力分别减少了 155 和 116  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；自然生产潜力总量分别减少了  $21.84 \times 10^4 \text{ t}$  和  $23.79 \times 10^4 \text{ t}$ ，减少率分别为 15.30% 和 10.91%；降低 1 单位地表湿润指数会使山区和平原的自然生产潜力总量分别减少  $87.36 \times 10^4 \text{ t}$  和  $118.95 \times 10^4 \text{ t}$ 。1998—2006 年，北京山区和平原区温度分别降低了  $0.34^\circ\text{C}$  和  $0.01^\circ\text{C}$ ，年降水量分别减少了 177 和 216 mm，地表湿润指数分别减少了 0.39 和 0.47。在此影响下，耕地单位自然生产潜力分别减少了 193 和 227  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；自然生产潜力总量分别减少了  $47.59 \times 10^4 \text{ t}$  和  $27.88 \times 10^4 \text{ t}$ ，减少率分别为 18.71% 和 20.99%；降低 1 单位地表湿润指数会使山区和平原的自然生产潜力总量分别减少  $71.49 \times 10^4 \text{ t}$  和  $101.26 \times 10^4 \text{ t}$ 。

可以看出，1979—1984 年，山区单位自然生产潜力减少量大于平原区，但由于山区耕地面积小使得其自然生产潜力总量减少量小于平原区；1998—2006 年，单位自然生产潜力减少量和自然生产潜力总量变化都明显大于 1979—1984 年，潜力总量减少率也有所上升。而且在此干旱过程中，山区单位自然生产潜力和自然生产潜力总量减少量均小于平原区。但结合干旱过程来看，每单位地表湿润指数变化给平原区生产潜力总量带来的变化均大于山区，而且 1979—1984 年，每单位地表湿润指数

变化带来的生产潜力总量变化大于 1998—2006 年。因此, 1998—2006 年, 干旱过程对耕地自然生产潜力的影响程

度要大于 1979—1984 年, 但 1979—1984 年干旱过程对耕地自然生产潜力的影响强度要大于 1998—2006 年。

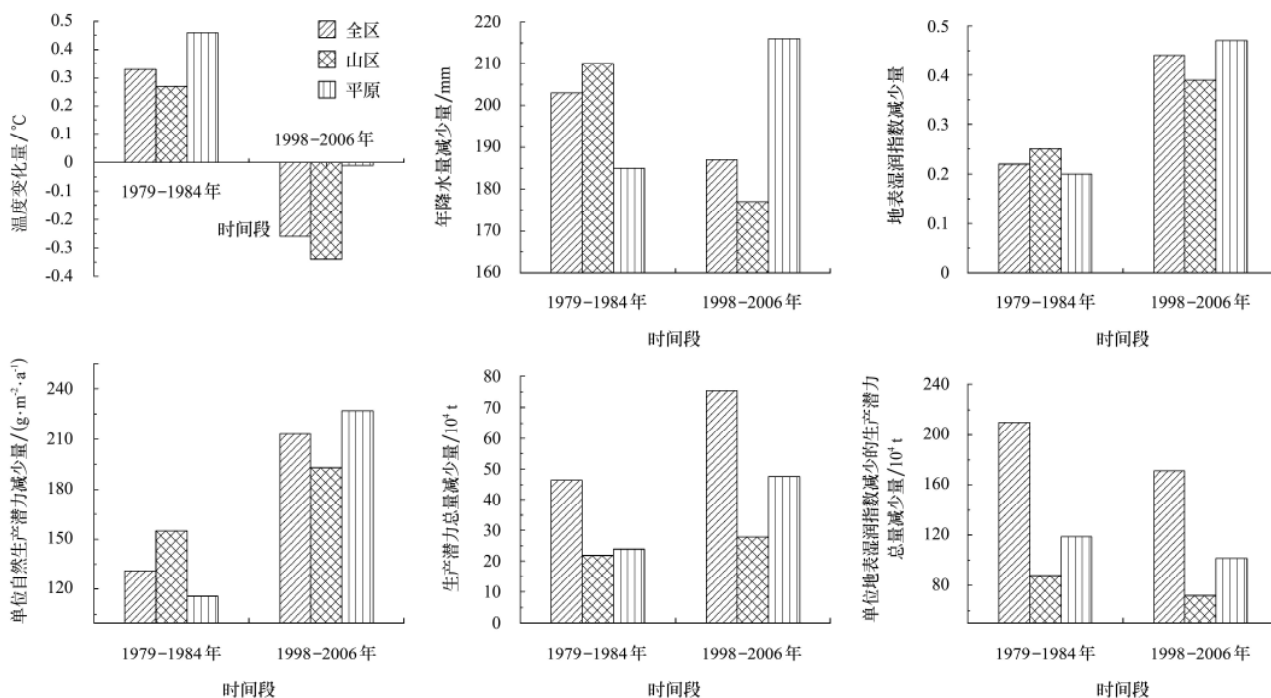


图 4 干旱过程对北京全区、山区和平原区耕地自然生产潜力影响

Fig.4 Effect of drought process on natural potential productivity of cultivated land in Beijing

#### 4 结论与讨论

本文利用地表湿润指数分析了北京 1951—2006 年的干湿变化趋势, 找出了典型的干旱过程, 并利用桑斯维特纪念模型计算了北京耕地的自然生产潜力, 在此基础上分析了干旱过程给耕地生产潜力带来的影响。主要结论如下:

1) 1951—2006 年, 北京地表湿润指数总体趋势为逐年下降, 其中 1979—1984 年和 1998—2006 年表现出比较明显的干旱过程。1979—1984 年, 温度上升了 0.33℃, 降水量减少了近 203 mm, 地表湿润指数减小了 0.22; 1998—2006 年, 温度降低了 0.26℃, 降水量减少了近 187 mm, 地表湿润指数减小了 0.44。

2) 北京平原区耕地自然生产潜力大于山区, 其中通州区耕地自然生产潜力最大, 延庆最小。1979、1984、1998 和 2006 年北京平均自然生产潜力分别约为 1 043、912、1 085 和 872 g/(m<sup>2</sup>·a), 潜力总量分别约为 368.87×10<sup>4</sup>、322.59×10<sup>4</sup>、383.72×10<sup>4</sup> 和 308.30×10<sup>4</sup> t。

3) 在干旱过程影响下, 在两个干旱过程中, 全区耕地自然生产潜力总量分别减少了 12.55% 和 19.66%, 山区耕地自然生产潜力总量分别减少了 15.30% 和 18.71%, 平原区耕地自然生产潜力总量分别减少了 10.91% 和 20.99%; 每降低 1 单位地表湿润指数, 全区自然生产潜力总量分别减少 210.36×10<sup>4</sup> t 和 171.41×10<sup>4</sup> t; 山区自然生产潜力总量分别减少 87.36×10<sup>4</sup> t 和 71.49×10<sup>4</sup> t; 平原区自然生产潜力总量分别减少 118.95×10<sup>4</sup> t 和 101.26×10<sup>4</sup> t。

由此可以看出, 干旱过程对耕地自然生产潜力的影响比较显著, 在耕地管理过程中, 要同时考虑耕地的数量、分布以及气候波动尤其是干旱过程对耕地生产功能的影响。

目前用于估算土地自然生产潜力的 3 种方法中, 光温阶乘模型通过对光合生产潜力→光温生产潜力→气候生产潜力→土地生产潜力几个阶段的逐步订正来估算土地生产潜力, 能较真实地反映土地的生产潜力, 但所需参数多、计算较复杂; 高产地块法简便易行, 但推广性和可比性较差; 本文采用的经验模型桑斯维特纪念模型具有计算简便、气候因子涵盖全面的优点, 但未全面考虑土壤、地形、灌溉等的影响, 因此在自然生产潜力的估算方面还存在一定的局限性和不确定性。本研究在理论上定量分析了干旱过程对耕地自然生产潜力的影响, 为今后耕地管理过程中加强对功能管理的重视提供了理论依据, 对于耕地保护和保障粮食安全具有一定的意义。全面考虑各个影响因子, 准确掌握干旱过程对耕地自然生产潜力的影响将是我们进一步努力的方向。

#### 【参 考 文 献】

- [1] 符淙斌, 延晓冬, 郭维栋. 北方干旱化与人类适应: 以地球系统科学观回答面向国家重大需求的全球变化的区域响应和适应问题[J]. 自然科学进展, 2006, 16(10): 1216—1223.
- [2] 史培军. 从南方冰雪灾害成因看巨灾防范对策[J]. 中国减灾, 2008, (2): 12—15.
- [3] 马柱国, 任小波. 1951—2006 年中国区域干旱化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 195—201.

- Ma Zhuguo, Ren Xiaobo. Drying trend over China from 1951 to 2006[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3 (4): 195—201. (in Chinese with English abstract)
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [5] 蔡运龙, 霍雅勤. 中国耕地价值重建方法与案例研究[J]. *地理学报*, 2006, 61(10): 1085—1092.
- Cai Yunlong, Huo Yaqin. Reevaluating cultivated land in China: Method and case studies[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(10): 1085—1092. (in Chinese with English abstract)
- [6] 赵昕奕, 蔡运龙. 区域土地生产潜力对全球气候变化的响应评价: 以中国北方农牧交错带中段为例[J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 584—590.
- Zhao Xinyi, Cai Yunlong. The vulnerability of regional land productivity to global climatic change: The case of the middle part of agricultural-pastoral zigzag zone in northern China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 584—590. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王令超, 王国强, 杨建波, 等. 农用地分等中作物生产潜力空间插值方法研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 83—93.
- Wang Lingchao, Wang Guoqiang, Yang Jianbo, et al. Spatial interpolation method of crop productive potentiality for the classification of agricultural land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 83—93. (in Chinese with English abstract)
- [8] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES—Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 30—36.
- Dai Minghong, Tao Hongbin, Liao Shuhua, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES—Maize model in the North China Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 30—36. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘纪远, 徐新良, 庄大方. 20 世纪 90 年代 LUCC 过程对中国农田光温生产潜力的影响: 基于气候观测与遥感土地利用动态观测数据[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(6): 483—492.
- Liu Jiuyan, Xu Xinliang, Zhuang Dafang. Impacts of LUCC processes on potential land productivity in China in the 1990s [J]. *Science in China Ser. D: Earth Sciences*, 2005, 35(6): 483—492. (in Chinese with English abstract)
- [10] 谢云, 王晓岚, 林燕. 近 40 年中国东部地区夏秋粮作物农业气候生产潜力时空变化[J]. *资源科学*, 2003, 25(2): 7—13.
- Xie Yun, Wang Xiaolan, Lin Yan. Temporal and spatial variation of climatic potential productivity for grain crops in Eastern China within forty years[J]. *Resources Science*, 2003, 25(2): 7—13. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高志强, 刘纪远, 曹明奎. 土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响[J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 581—591.
- Gao Zhiqiang, Liu Jiuyan, Cao Mingkui. Impacts of land use and climate change on regional net primary productivity[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 59(4): 581—591. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孔祥斌, 张凤荣, 姜广辉, 等. 国外农用地保护对北京市耕地保护的启示[J]. *中国土地科学*, 2005, 19(5): 50—54.
- Kong Xiangbin, Zhang Fengrong, Jiang Guanghui, et al. Inspiration of foreign experience on arable land protection of Beijing[J]. *China Land Science*, 2005, 19(5): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵华甫, 张凤荣, 许月卿, 等. 北京城市居民需要导向下的耕地功能保护[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 56—62.
- Zhao Huafu, Zhang Fengrong, Xu Yueqing, et al. Urban residents needs-oriented functional protection of cultivated land in Beijing[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 56—62. (in Chinese with English abstract)
- [14] 田志会, 李凤琴, 郭文利. 基于小网格的北京山区植物气候生产力极其限制因子分析[J]. *中国农业大学学报*, 2004, 9(6): 21—26.
- Tian Zhihui, Li Fengqin, Guo Wenli. Analysis of plant climatic production potential and its restricting factors of 1 km<sup>2</sup> grid of Beijing mountain area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(6): 21—26. (in Chinese with English abstract)
- [15] 田志会, 郭文利, 赵新平. 北京地区 1km<sup>2</sup> 网格植物气候生产力的估算[J]. *中国农业资源与区划*, 2006, 27(2): 59—62.
- Tian Zhihui, Guo Wenli, Zhao Xinping. Calculation of plant climatic productivities by 1 km<sup>2</sup> in Beijing[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2006, 27(2): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [16] 姜广辉, 张凤荣, 秦静. 北京山区农村居民点分布变化及其与环境的关系[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 85—92.
- Jiang Guanghui, Zhang Fengrong, Qin Jing. Relationship between distribution changes of rural residential land and environment in mountainous areas of Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(11): 85—92. (in Chinese with English abstract)
- [17] 贺士元, 邢其华, 尹祖棠, 等. *北京植物志*[M]. 北京: 北京出版社, 1993.
- [18] He Chunyang, Norio O, Zhang Qiaofeng, et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China[J]. *Applied Geography*, 2006, 26(3/4): 323—345.
- [19] 刘庚山. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(4): 21—27.
- Liu Gengshan. Research progress in Palmer Drought Severity Index and its application[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(4): 21—27. (in Chinese with English abstract)
- [20] McKee T, Doesken N, Kleist J. Drought monitoring with multiple timescales[C]//*Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*. Boston, MA: American Meteorological Society, 1995: 233—236.
- [21] 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. *气象学报*, 2001, 59(6): 737—746.
- Ma Zhuguo, Fu Congbin. Trend of surface humid index in the arid area of Northern China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(6): 737—746. (in Chinese with English abstract)
- [22] Mann H. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrika*, 1945, 13(3): 245—259.
- [23] Sneyers R. Sur la détermination de la stabilité des séries climatologiques[C]//*Recherches sur la zone aride*. UNESCO, Paris, 1963: 37—44.
- [24] Sneyers R. Sur l'analyse statistique des séries d'observations[M]. Genève: OMM Publ, 1975, 143.
- [25] Goossens C, Berger A. Annual and seasonal climatic



- variations over the Northern Hemisphere and Europe during the last century[J]. *Annales Geophysicae*, 1986, 4(4): 385—400.
- [26] Ma Zhuguo, Fu Congbin. Some evidences of drying trend over North China from 1951 to 2004[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(23): 2913—2925.
- [27] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482—493.  
Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482—493. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘扬, 贾树海, 那波. 土地生产潜力计算方法研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(12): 376—381.  
Liu Yang, Jia Shuhai, Na Bo. Study of the calculating method of land potential productivity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(12): 376—381. (in Chinese with English abstract)
- [29] 黄秉维. 华北平原农业和水利问题及农业生产潜力研究[C]//*地理集刊*, 第17号 (农业生产潜力研究). 北京: 科学出版社, 1985: 1—14.
- [30] Jones P, Thornton P. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055[J]. *Global Environmental Change*, 2003, 13(1): 51—59.
- [31] Yun J. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 77(1): 23—38.
- [32] Priya S, Shibasaki R. National spatial crop yield simulation using GIS — based crop production model[J]. *Ecological Modeling*, 2001, 136(2/3): 113—129.
- [33] William E, Albert W, Cynthia J, et al. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: The case of the US Great Plains[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90(1/2): 51—63.
- [34] 陈国南. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J]. *自然资源学报*, 1987, 2(3): 270—278.  
Chen Guonan. Preliminary study on calculation of primary production of ecosystem in china with application of miami model[J]. *Journal of Natural Resources*, 1987, 2(3): 270—278. (in Chinese with English abstract)
- [35] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. *植物生态学报*, 1995, 19(3): 193—200.  
Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. A natural vegetation NPP model[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(3): 193—200. (in Chinese with English abstract)
- [36] 吴志杰. 基于GIS的漳州市土地气候生产潜力分析[J]. *龙岩学院学报*, 2006, 24(6): 71—73.  
Wu Zhijie. GIS — based analysis on climatical potential productivity of land in Zhangzhou[J]. *Journal of Longyan University*, 2006, 24(6): 71—73. (in Chinese with English abstract)
- [37] Mitas L, Mitasova H. General variational approach to the interpolation problem[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1988, 16(12): 983—992.

## Effect of drought process on natural production function of cultivated land

Zhao Yuanyuan<sup>1,2</sup>, He Chunyang<sup>1,2\*</sup>, Yao Hui<sup>3</sup>, Huang Qingxu<sup>1</sup>, Yang Yang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (Beijing Normal University), Beijing 100875, China;

2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Shandong Province Heze Construction Bureau, Heze 274000, China)

**Abstract:** Assessing the effect of drought process on the production function objectively is helpful to cultivated land conservation. The effect of drought on production function of cultivated land in Beijing was evaluated. Firstly, the drought conditions were characterized by the surface wetting index (SWI), and the typical drought periods were identified using Mann-Kendall testing method. Then natural potential productivity of non-changed cultivated land was calculated with meteorological data using Thornthwaite Memorial model. Finally, the effect of drought on natural potential productivity of cultivated land was analyzed. Main conclusions were as follows: From 1951 to 2006, the SWI decreased with some fluctuation. The drought was significant during the periods of 1979-1984 and 1998-2006. Annual mean potential productivity was 1 043 g/(m<sup>2</sup>·a) in 1979, 912 g/(m<sup>2</sup>·a) in 1984, 1 085 g/(m<sup>2</sup>·a) in 1998, and 872 g/(m<sup>2</sup>·a) in 2006. The natural potential productivity in Tongzhou County was bigger than those in other counties, but that in Yanqing County was the smallest. The drought had great impacts on natural potential productivity. The total potential productivity loss exceeded 10% during the period of 1979-1984, and accounted for nearly 20% during the period of 1998-2006. Therefore, the government should simultaneously take into account the quantity and distribution of the cultivated land, and the impacts of climatic fluctuation especially the drought on the production function in the cultivated land management.

**Key words:** drought, productivity, model, surface wetting index, Beijing, Mann-Kendall testing method