文章编号:1000-7601(2016)03-0206-07

# 黄土高原近 50 年降水量时空变化特征分析

王利娜<sup>1</sup>,朱清科<sup>1</sup>, 仝小林<sup>2</sup>, 王 瑜<sup>1</sup>, 陈文思<sup>1</sup>, 卢纪元<sup>1</sup> (1.北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2.延安市退耕还林工程管理办公室, 延安 716000)

摘 要:为了揭示黄土高原近年来降水量的时间变化和空间分布特征,以黄土高原区域及周边 72 个气象基准站 1961—2012 年 52 a 逐日降水资料为基础,通过泰森多边形法将各雨量站的降水量展布到整个区域,采用 M-K 趋势检验法分析年降水的年际、年内时空变化特征。结果显示:(1)黄土高原年降水量时间变化呈缓慢下降趋势, UFK 曲线小于 0 且没有超出置信线。空间上整体呈下降趋势,出现阳泉、榆社站两个显著减少中心, $\beta$  值分别为 - 3.3 mm·10a<sup>-1</sup>和 - 2.1 mm·10a<sup>-1</sup>。(2)黄土高原春季多年平均降水量整体呈不明显下降趋势,1961—1963 年与 1966—1987 年降水量呈减少趋势,1963—1966 年与 1987—2012 年呈增加趋势。空间上西部、北部地区大部分呈增加趋势,五台山增加幅度最大, $\beta$  值为 2 mm·10a<sup>-1</sup>。(3)夏季多年平均降水量呈明显下降趋势,2008 年左右为突变点,2008 年以后降水量下降显著。空间上整体呈下降趋势,较明显的减少中心有环县、延安、西峰镇、平凉和临汾, $\beta$  值分别为 - 0.9、 - 0.8、 - 0.8 mm·10a<sup>-1</sup>和 - 0.8 mm·10a<sup>-1</sup>。(4) 秋季多年平均降水下降趋势显著,空间变化 与夏季类似,减少中心依然是环县、延安、西峰镇、平凉和临汾, $\beta$  值均为 - 0.8 mm·10a<sup>-1</sup>。(5) 冬季多年平均降水 量整体呈明显上升趋势,空间上降水变化呈缓慢上升趋势,最大上升中心华山, $\beta$  值仅为 0.95 mm·10a<sup>-1</sup>。

关键词: 降水量;时空变化;M-K检验法;黄土高原

中图分类号: S161.6 文献标志码: A

## Characteristic analysis of temporal and spatial variation of precipitation during recent 50 years in Loess Plateau

WANG Li-na, ZHU Qing-ke, TONG Xiao-lin, WANG yu, CHEN Wen-si, LU Ji-yuan

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combat,

Ministry of Education, Beijing Forestry University, China, Beijing, 100083;

2. Management office of returning farmland to forest project of the Yanan City, Yanan, 716000)

Abstract: In ording to reveal the characteristic of time variation and spatial distribution of precipitation during recent years in Loess Plateau, based on the 52 years daily precipitation data from 1961 to 2012 in the Loess Plateau Region and surrounding 72 meteorological stations, the Tyson polygon method was applied to distribute the precipitation in each rainfall station to whole region. The M – K trend test method was adopted to analyze the characteristics of yearly precipitation temporal and spatial variation. The results showed that: (1) The annual rainfall in Loess Plateau has showed a trend of slow decline with time, UFK curve was less than zero and not exceeded the confidence line. In space whole showed a decline trend and appeared two significant reduction centers as Yangquan and Yushe Stations, the  $\beta$  value was -3.3 mm  $\cdot 10a^{-1}$  and -2.1 mm  $\cdot 10a^{-1}$ , respectively. (2) The multi-year average rainfall in Spring of the Loess Plateau has showed no obvious decline trend on the whole. The precipitation from 1966 to 1987 and 1961 to 1963 has showed a decrease trend; but from 1963 to 1966 and 1987 to 2012 has showed an increase trend. In space most of the west and north region has showed an increase trend. The Wutai Mountain was the maximal increase range, the  $\beta$  value was 2 mm  $\cdot 10a^{-1}$ . (3) The multi-year average rainfall in Summer has showed an obvious downward trend, around 2008 was the mutation point, after 2008 the precipitation has notablely decreased. In space has showed a decline trend on the whole, rather obvious decrease centers were Huanxian, Yan'an, Xifeng, Pingliang and Linfen, the  $\beta$  value was -0.9, -0.9,-0.8, -0.8 mm  $\cdot 10a^{-1}$  and -0.8 mm  $\cdot 10a^{-1}$ , respectively. (4) The multi-year average precipitation in Autumn has

收稿日期:2015-05-22

基金项目:国家林业公益课题"黄土丘陵严重侵蚀区植被恢复和重建技术研究(201104002-2)

作者简介:王利娜(1985—),女,河北承德人,博士,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:lina8509@163.com。

通信作者:朱清科(1956—),男,博士(后),讲师,主要从事水土保持与荒漠化防治。E-mail:zhuqingke@sohu.com。

showed a notable decrease trend, the space change was similar with Summer, the decrease centers still was the Huanxian, Yan'an, Xifeng, Pingliang and Linfen. The  $\beta$  value total was  $-0.8 \text{ mm} \cdot 10a^{-1}$ . (5) The multi-year average rainfall in Winter was showed an obvious rising trend on the whole, the changes slowed a slowly rising trend on the space, the largest rise center was Huashan, the  $\beta$  value was only 0.95 mm  $\cdot 10a^{-1}$ .

Keywords: precipitation; temporal and spatial variation; M - K test method; Loess Plateau

黄土高原是中国乃至世界水土流失最为严重的 地区之一<sup>[1]</sup>,大气降水既是黄土高原地区水分的主 要补给来源,又是产生土壤侵蚀的重要因素,降水量 与降水强度的变化决定水土流失发生的强度和影响 范围。近年来,在全球气候变暖的背景下,水循环速 度加快,使得水循环系统的稳定性降低,干旱、暴雨 等极值天气过程呈现出广发、频发的态势,给我国自 然生态系统和社会经济系统带来了多层次的负面影 响<sup>[2]</sup>。国内外诸多学者对此展开一系列研究<sup>[3-7]</sup>, 据相关资料显示,20世纪黄土高原降水在时间序列 上经历了由少许的增加转向减少的过程<sup>[8-11]</sup>。黄 土高原年降水量在空间上由东南向西北递减,且 200、400、600 mm 降水量等值线不断南移<sup>[12]</sup>。掌握 变化环境下降水量的时空变化趋势,可以为防治水 土流失起到指导作用。

本文以黄土高原为研究对象,采用 M-K 法对 黄土高原区域及周边 72 个气象站点年降水量进行 趋势检测,揭示黄土高原近 50 年年降水的年际、年 内时空变化趋势,以期为黄土高原区域防治水土流 失灾害的预测与应对提供科学依据。

### 1 研究区域概况

黄土高原的范围至今尚无定论[13],本文采用黄

土高原地区综合科学考察队界定的范围:地处 100° 52′~114°33′E,33°41′~41°16′N之间,即秦岭山脉以 北,阴山山脉以南,太行山脉以西,青藏高原东缘以 东,总面积约62.38万km²。黄土高原地区地势西北 高、东南低,海拔1000~2000m,区域地理位置及地 形分布如图1所示。郑宝明等<sup>[14]</sup>根据黄土高原地 区的地形、地貌等自然条件将黄土高原分为黄土丘 陵沟壑区、黄土高原沟壑区、黄土阶地区、冲积平原 区、高地草原区、干旱草原区、土石山区、风沙区和林 区九大类型区。黄土高原地区涉及5省(自治区)的 34个地(市)191个县(旗),研究区基本情况见表1。



图 1 研究区地理位置和地形分布

Fig. 1 The geographical position and topographic distribution of the research region

省(自治区) Provinces (Autonomous Regions)	面积 Area /10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	年平均降水 Annual average precipitation/mm	人口 Population /10 <sup>4</sup> 人	GDP/万元 GDP /RMB 10 <sup>4</sup> yuan
陕西 Shaanxi	20.58	576.9	3735	12391.3
山西 Shanxi	15.60	525.5	3571	5733.4
内蒙古 Inner Mongolia	118.30	262.0	2470	11700.0
宁夏 Ningxia	5.18	400.0	630	1334.6
甘肃 Gansu	45.37	300.0	2557	5020.0

	12 1	前九匹本本佩加
Table 1	The basic	situation of the research regions

黄土高原的气候既受经、纬度的影响,又受地形的制约,属于典型大陆季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,雨热同步。年平均温度 9℃~12℃,最冷月平均温度 -6℃~-2℃,最热月平均温度 22℃~26℃;全年日照时数为 2 000~3 000 h。黄土高原除六盘山、吕梁山、太行山等高大山体附近气候冷凉外(≥10℃积温小于 2 500℃,无霜期 120 d),大部分

地区属暖温、中温带,≥10℃积温为2500℃~ 4500℃,无霜期150~250 d。年降水量为200~600 mm,其中东南部地区年降水量为650~700 mm,是区 内降水最丰沛的地区。黄土高原降水量年内分布极 不均匀,多集中于夏季,占全年降水量的56.7%, 秋、春、冬季各占全年降水量的26.7%、4.5%、 2.1%。降水量年际变化率大,丰水年可达695 mm, 干旱年只有 200 mm, 500~550 mm 降水量保障率只 有 17.7%。

2 数据及研究方法

#### 2.1 数据选取

综合考虑各站点资料的可靠性和完整性以及在 黄土高原区域的代表性,选取由气候中心提供的黄 土高原区域内及附近 72 个常规气象站 1961—2012 年 52 a 系列地面气象逐日降水观测资料。资料较 完整,所选站点空间分布尺度较均匀,遍布整个黄土 高原及周边区域。就统计学角度而言,通过分析这 些长系列资料所获取的趋势分析结果较可信。

### 2.2 方法分析

2.2.1 泰森多边形 泰森多边形是通过离散雨量 站点的降雨量来计算整个区域平均降雨量的计算方 法。具体步骤:首先将相邻的任意两个离散雨量站 点相连形成若干个三角形,再对各三角形的三边分 别做垂线,垂线相交可形成若干个不规则多边形,即 泰森多边形。每个泰森多边形中都存在唯一一个雨 量观测站点,这个站点所观测的降雨数据代表整个 泰森多边形范围内的降雨量。这一过程可通过 ArcGIS 绘制完成,结果见图 2。





#### 图 2 泰森多边形网

Fig.2 The Tyson polygon network

2.2.2 M-K检验法 M-K法是由世界气象组织 推荐,广泛应用于水文气象要素时间序列趋势分析 的一种方法,是一种非参数统计检验方法,既不需要 样本遵从一定分布又不受少数异常值干扰,因此更 适合非正态分布或删减后的时间序列分析<sup>[15-16]</sup>。 此外,M-K法还可以对时间序列进行突变检验,确 定发生突变的位置,分析不同阶段序列的变化趋势。 假定时间序列随机独立,得出以下统计量:

$$UF_k = (d_k - E(d_k)) / \sqrt{D(d_k)} \quad (2 \le K \le n)$$
(1)

其中, 
$$d_k = \sum_{i=1}^{n} r_i, E(d_k) = K(K-1)/4,$$
  
 $D(d_k) = K(K-1)(2K+5)/72$  (2)

式中, $r_i$ 为第i个样本 $X_i$ 的累计数, $X_j < X_i$ (2  $\leq j \leq i$ )。若  $UF_k$ 值大于0,序列呈上升趋势,小于0呈下降趋势;若超出临界线则表明上升或下降趋势显著。将此法应用到逆序列当中,求出  $UB_k$ 。若  $UF_k$ 与 $UB_k$ 在置信区间内相交,则交点对应的时刻即为突变发生

的时刻。

另外,其 Kendall 倾向度 β 值可衡量趋势的大小, β 值为正表示上升趋势,为负表示下降趋势,绝对值 越大表示趋势上升或下降越显著。计算公式如下:

$$\beta = median\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \forall i < j$$
(3)

式中, $1 \leq j < i \leq n_{\circ}$ 

### 3 结果与讨论

### 3.1 降水时间变化特征分析

统计分析黄土高原 1961—2012 年降水量年际、 年内变化趋势,并采用 M – K 秩次相关检验法对研 究区降水因子变化趋势进行显著性检验分析,本文 在置信度 α = 0.05 的水平上检验变化趋势与突变 点,如图 3 所示。

从图 3(A)可知,黄土高原年降水量整体变化不显著。近 50 a 降水量在 310~693 mm 之间变化,最低值和最高值分别出现在 1965 年、1964 年,多年平均降水量为 470 mm。从 UFK 曲线可以看出,除

1964、1967、1985、1990年为正值外,其余时间序列均 小于 0,表明年降水量总体呈下降趋势。因 UFK 值



5 a滑动平均 5 years moving average

没有超出置信线,则表明近 50 a 年降水量变化不显 著。













1994 2000 2003 2006

2009

1991 1997



3 2

1

0

-1 -2 -3

-4

964 1967 970 1973 1976 979

1961

M-K statistics M-K统计值







图 3 黄土高原 1961-2012 年降水量年际(五年滑动平均)、年内变化趋势及 M-K曲线

Fig.3 The variation tendency of annual precipitation (five - years moving average)

during 1961-2012 and M-K curve in Loess Plateau

从图 3(B)可知,黄土高原春季多年平均降水量 占全年的 15.67%,整体呈不明显下降趋势,近 50 a 降水量中只有 17 a 高于多年平均降水量。1971— 1982年连续 12 a 出现少雨现象。从 UFK 曲线可以 看出,1963年、1966年和 1987年将春季降水量时间 序列分成四个阶段,1961—1963年与 1966—1987年 降水量呈减少趋势,1963—1966年与 1987—2012年 呈增加趋势。又因 UFK 值没有超出置信线,则表明 近 50a 春季降水量变化不显著。

从图 3(C)可知,黄土高原夏季多年平均降水量 占全年的 54.72%,多年平均降水量为 257 mm,整体 呈明显下降趋势。近 50 a 夏季降水量极大值 343 mm亦出现在 1964年,表明年降水量极大值出现在 这年,夏季降水量占很大比例。从 UFK 曲线可以看 出,整个时间序列均小于 0,表明夏季降水量呈下降 趋势。因 2008年以前没有超出置信线,表明 1961— 2008年夏季降水量变化不显著,2008年以后,UFK 曲线超出置信线,表明 2008—2012年夏季降水量下 降显著,而 2008年是突变点,表明降水量变化趋势 发生突变。

从图 3(D)可知,黄土高原秋季多年平均降水量 占全年的 27.36%,整体呈明显下降趋势,近 50 a 降 水量只有 12 a 高于多年平均降水量。1986—2002 年连续 17 a 出现少雨现象。从 UFK 曲线可以看出, 整个时间序列均小于 0,表明秋季降水量呈下降趋 势。1991—2006 年 UFK 值超出置信线,表明这段期 间秋季降水量下降显著。1991 年和 2006 年是突变 点,表明降水量变化趋势发生突变。

从图 3(E)可知,黄土高原冬季多年平均降水量 占全年的 2.25%,整体呈明显上升趋势。多年平均 降水量 10.57 mm,最高值 27.23 mm 出现在 1989 年, 最低值 0.08 mm 出现在 1976 年。1961—1980 年连 续 20 a 出现少雨现象。从 UFK 曲线可以看出,1978 年以前,UFK 值有正有负,且在 0 附近波动,表明冬 季降水量变化不大。1978 年以后,UFK 值大于 0,表 明冬季降水量呈增加趋势,且在 1981 年以后超出置 信线,表明 1981—2012 年冬季降水量增加趋势显 著,1981 年为突变点,降水量变化趋势发生突变。

### 3.2 降水空间变化特征分析

3.2.1 多年降水空间变化特征 计算黄土高原区 域及附近 72 个气象基准站 52 a 年降水量的 Kendall 倾斜度,再用 GIS 空间分析生成等值线(图 4)。从 图中可以看出,整个区域降水倾斜度 β 值负值居 多,说明整体呈下降趋势,且负值绝对值大于正数, 则下降幅度比上升幅度大。在阳泉站和榆社站存在 两个显著的减少中心,β值分别为-3.3 mm·10a<sup>-1</sup> 和-2.1 mm·10a<sup>-1</sup>,是整个区域降水减少幅度最大 的站点。区域的西部地区和北部地区降水倾斜度均 为正值,降水呈缓慢上升趋势,最大值出现在西部地 区边界线附近,仅为1.8 mm·10a<sup>-1</sup>。





3.2.2 年內降水空间变化特征 同样应用上述方 法对黄土高原年内各季降水空间分布特征进行研 究,如图 5 所示。春季(图 5A)黄土高原降水大部分 呈增加趋势,主要分布在西部地区和北部地区,其中 增加幅度最大的站点是五台山,  $\beta$  值为 2 mm·  $10a^{-1}$ ,其次是华家岭、五寨和右玉,  $\beta$  值均为0.7 mm · $10a^{-1}$ 。 $\beta$  值为负值的站点集中在区域的西南地 区,主要有同心、固原、平凉、长武和武功等,  $\beta$  值分 别为 – 0.2、– 0.3、– 0.1、– 0.4 mm· $10a^{-1}$ 和 – 1.1 mm· $10a^{-1}$ 。

夏季(图 5B)黄土高原降水除五台山(2.2 mm· 10a<sup>-1</sup>)和五寨(0.7 mm·10a<sup>-1</sup>)两个上升趋势明显的 站点外,其它均呈下降趋势,从西南向东北,下降幅 度变化先变大再变小。其中 5 个较明显的减少中心 出现在环县、延安、西峰镇、平凉和临汾, $\beta$ 值分别为 -0.9、-0.9、-0.8 mm·10a<sup>-1</sup>和-0.8 mm· 10a<sup>-1</sup>。

秋季(图 5C)黄土高原降水空间变化趋势与夏 季类似,除五台山(2.2 mm·10a<sup>-1</sup>)和五寨(0.6 mm· 10a<sup>-1</sup>)两个明显的上升中心外,其它各站均不同程 度地呈下降趋势,下降幅度比夏季略小,减少中心没 有变,依然是环县、延安、西峰镇、平凉和临汾,β值

β 值趋于零。

均为 - 0.8 mm·10a<sup>-1</sup>。整体下降幅度变化亦是从西南向东北逐渐先变大后变小。

冬季(图 5D)黄土高原降水均呈上升趋势,上升 趋势不显著,从西北向东南上升幅度逐渐变大,但最

> 呼和浩特 呼和浩特 包头 包头 鄂托克萨 ミント 银川 银川 0.4 大厦 榆 /榆 介休 -0.2 西吉固原 西峰镇 崆峒(平凉 ·长武 • 0,5 郑州 石泉 汉中 石泉 (A) 春季 Spring (B) 夏季 Summer 呼和浩特 呼和浩特 包头 包头 N Ν 鄂托克 五寨 银川 邢台 介伏 0. 洛川 新名 武都 略阳 汉中 石泉 汉中 石泉

> > (C) 秋季 Autumn

(D) 冬季 Winter

图 5 黄土高原年内降水量 Kendall 倾斜度等值线



### 4 结 论

本文以黄土高原区域为研究对象,获取区域内 及周边 72 个气象基准站逐日降水资料,年序列为 1961—2012 年共 52 a。通过泰森多边形法将各雨量 站的降水量展布到整个区域,再采用 M - K 趋势检 验法分析年降水的年际、年内时空变化特征,初步得 到下列结论:

(1)黄土高原年降水量时间变化整体呈缓慢下降趋势,UFK曲线在近50a时间序列均小于0且没有超出置信线;空间上,年降水量呈下降趋势,阳泉、榆社站出现两个显著减少中心,β值分别为-3.3 mm·10a<sup>-1</sup>和-2.1 mm·10a<sup>-1</sup>,区域的西部地区和北部地区降水呈缓慢上升趋势。

(2) 黄土高原春季多年平均降水量整体呈不明 显下降趋势,1961—1963 年与 1966—1987 年降水量 呈减少趋势,1963—1966 年与 1987—2012 年呈增加 趋势,UFK 值没有超出置信线,没有突变点。空间 上,区域的西部地区和北部地区大部分呈增加趋势, 五台山增加幅度最大,β值为2 mm·10a<sup>-1</sup>,区域的 西南地区β值为负值的站点较集中。

(3) 夏季多年平均降水量呈明显下降趋势, UFK 曲线在整个时间序列均小于 0,2008 年左右为 突变点,2008 年以后降水量下降显著。空间上,大 部分站点降水呈下降趋势,下降幅度变化由西南向 东北先变大再变小,较明显的减少中心有环县、延 安、西峰镇、平凉和临汾,β值分别为 – 0.9、 – 0.9、 – 0.9、 – 0.8 mm·10a<sup>-1</sup>和 – 0.8 mm·10a<sup>-1</sup>。

大的上升中心华山, $\beta$  值也仅为 0.95 mm·10a<sup>-1</sup>。其

次是长武、洛川和阳城, $\beta$ 值均为 $0.6 \text{ mm} \cdot 10a^{-1}$ 。区

域内存在三个基本无变化的点有吴旗、离石和西安,

(4)秋季多年平均降水下降趋势显著,整个时间序列 UFK 曲线均小于 0,1991 年和 2006 年是突变点,1991—2006 年降水量下降趋势发生突变。空间变化与夏季类似,减少中心依然是环县、延安、西峰镇、平凉和临汾,β值均为-0.8 mm·10a<sup>-1</sup>。

(5) 冬季多年平均降水量整体呈明显上升趋势,1981 年以后 UFK 值超出置信线,降水量变化趋势发生突变。空间上降水变化呈缓慢上升趋势,由西北向东南上升幅度逐渐变大。最大上升中心华山,β 值仅为 0.95 mm·10a<sup>-1</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 李 勉,姚文艺,李占斌,黄土高原草本植被水土保持作用研究 进展[J].地球科学进展,2005,20(1):74-20.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 张建兴,马孝义,赵文举,等.黄土高原地区干旱长期变化趋势 及预测[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):1-6.
- [4] Loukas A, Vasiliades L. Probabilistic analysis of drought spationtemporal characteristics in Thessaly region, Greece [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, (4):719-731.
- [5] 王位泰,张天峰,姚玉壁,等.黄土高原夏半年降水气候变化特

征对作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):154-158.

- [6] 闵 山,钱永甫.中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J].水科学进展,2008,19(6):763-771.
- [7] 方红远,甘升伟,余莹莹.区域供水系统干旱历时特性综合分析 [J].水科学进展,2007,18(1):95-101.
- [8] 刘引鸽.陕北黄土高原降水的变化趋势分析[J].干旱区研究, 2007,24(1):49-55.
- [9] 段建军,王小利,高照良,等.黄土高原地区 50 年降水时空动态 与趋势分析[J].水土保持学报,2009,23(5):143-146.
- [10] 王万忠,焦菊英,郝小品.黄土高原暴雨空间分布的不均匀性 及点面关系[J].水科学进展,1999,10(2):165-169.
- [11] 殷水清,谢 云.黄土高原地区中小流域日降雨空间分布特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(1):89-91.
- [12] 李 志,郑粉莉,刘文兆.1961-2007 年黄土高原极端降水事 件的时空变化分析[J].自然资源学报,2010,25(2):291-299.
- [13] 朱清科,张 岩,赵磊磊,等.陕北黄土高原植被恢复及近自然造林[M].北京:科学出版社,2012.
- [14] 郑宝明,田承志,王 煜,等.黄土丘陵沟壑区第一副区小流域 坝系建设理论与实践[M].郑州:黄河出版社,2004:4-6.
- [15] 王金星,张建云,李 岩,等.近50年来中国六大流域径流年 内分配变化趋势[J].水科学进展,2008,19(5):656-660.
- [16] 夏 军,王渺林.长江上游流域径流变化与分布式水文模拟
   [J].资源科学,2008,30(7):962-967.

### (上接第185页)

- [4] 庞振凤.麦茬直播优质旱稻高产栽培技术[J].河南农业,2009,(8):56.
- [5] Yang X G, Bouman B A M, Wang H Q, et al. Performance of temperate aerobic rice under different water regimes in North China[J]. Agricultural Water Management, 2005,74:107-122.
- [6] 李世奎,霍治国,王道龙,等,中国农业灾害风险评价与对策 [M].北京:气象出版社,1999.
- [7] Wosten J H M, Lilly A, Nemes A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soil [J]. Geoderma, 1999,90:169-185.
- [8] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA2000: modeling lowland rice [M]. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, and Wageningen University and Research Centre, Wageningen, Netherlands, 2001.
- [9] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 北方冬小麦干旱灾损风险区划 [J]. 作物学报, 2005, 31(3): 267-274.
- [10] 薛昌颖,霍治国,李世奎,等.北方冬小麦产量灾损风险类型地 里分布[J].应用生态学报,2005,16(4):620-625.
- [11] 薛昌颖,杨晓光, Bouman B A M,等. ORYZA2000 模型模拟北京 地区旱稻的适应性初探[J]. 作物学报, 2005, 31 (12): 1567-1571.
- [12] 薛昌颖,杨晓光,邓 伟,等.利用 ORYZA2000 模型分析北京 地区旱稻产量潜力及需水特征[J].作物学报,2007,33(4):

625-631.

- [13] Xue C Y, Yang X G, Bouman B A M, et al. Optimizing yield, water requirements, and water Productivity of aerobic rice for the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2008,26(6):459-474.
- [14] 李亚龙,崔远来,李远华,等.基于 ORYZA2000 模型的旱稻生 长模拟及氮肥管理研究[J].农业工程学报,2005,21(12):141-146.
- [15] Feng L P, Bouman B A M, Tuong T P, et al. Exploring options to grow rice under water-short conditions in northern China using a modeling approach. I: Field experiments and model evaluation[J]. Agricultural Water Management, 2007,88:1-13.
- [16] 薛昌颖.北京地区旱稻非充分灌溉模式及灌溉降低干旱风险 研究[D].北京:中国农业大学,2008.
- [17] 李亚龙.水稻和旱稻水肥综合调控的田间试验及数值模拟研 究[D].武汉:武汉大学,2006.
- [18] 阎 静.旱稻苗期的氮素吸收及不同品种和稻麦系统的氮素 效应[D].北京:中国农业大学,2010.
- [19] 余 珺.直播旱稻播量对产量影响和稀播条件下分蘖发生及成穗规律[D].北京:中国农业大学,2008.
- [20] 刘志娟,杨晓光,薛昌颖,等.华北地区旱稻产量适应性及耗水 特征分析[J].中国生态农业学报,2008,16(5):1143-1148.
- [21] 张秋平,杨晓光,薛昌颖,等.北京地区旱稻作物需水与降水的 耦合分析[J].农业工程学报,2007,23(10):51-56.