

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第34卷第5期 2014年3月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据..... 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析..... 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....  
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....  
..... 陈旭飞,张池,戴军,等 (1114)

### 个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李勇,袁玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡婷,谷洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响..... 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响..... 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李西,王丽华,刘尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....  
..... 李倩倩,赵旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周蓉,邓自发 (1224)

### 种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埭埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓异,蔡立哲,郭涛,等 (1244)

- 不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响…………… 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253)
- 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子…………… 陆欣鑫,刘 妍,范亚文 (1264)
- 江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价…………… 李 佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)

### 景观、区域和全球生态

- 中国自然保护综合地理区划…………… 郭子良,崔国发 (1284)
- 近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应 …………… 缪丽娟,蒋 冲,何 斌,等 (1295)
- 人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响 …………… 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302)
- 2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化 …………… 淡永利,王宏志,张 欢,等 (1311)

### 资源与产业生态

- 三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布…………… 李 芬,吴志丰,徐 翠,等 (1318)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 282 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-03



**封面图说:** 插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人和大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210201457

李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052.

Li B Z, Zhou G S. Advance in the study on drought index. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1043-1052.

## 干旱指标研究进展

李柏贞, 周广胜\*

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 干旱作为全球最为常见的自然灾害之一, 已经对我国的农业生产造成了严重影响。为更好地预测影响作物的干旱并及时采取应对措施, 综述了国内外广泛应用的各类干旱指标, 包括气象指标、土壤墒情指标、作物生理生态指标及其它综合监测指标等, 评述了各类干旱指标的优缺点以及在农业上的适用性, 探讨了未来以作物干旱为核心的干旱指标研究拟重视的方面, 以为减缓和预防干旱对农业的不良影响及制订科学的政策提供依据。

**关键词:** 干旱指标; 气象指标; 土壤墒情指标; 作物生理生态指标; 综合监测指标

### Advance in the study on drought index

LI Bozhen, ZHOU Guangsheng\*

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** Drought as one of the most common natural disaster in the world, had caused serious influence on agricultural production in China. To accurately predict the drought affecting agricultural production, this paper reviews various kinds of drought indices which are widely used at home and abroad in recent years, including meteorological index, soil moisture index, crop physiological and ecological index, and other comprehensive monitoring index. Moreover, this paper also analyzes the advantage and disadvantage of different drought indices and their adaptabilities in agriculture, and discusses the important tasks of drought index research centering on crop drought in the future, in order to mitigate and prevent the negative impact of drought on agricultural and provide reference for the manage countermeasures.

**Key Words:** drought index; meteorological index; soil moisture content index; crop physiological and ecological index; comprehensive monitoring index

大量矿物燃料的燃烧、乱砍滥伐等人类活动和工业化过程已经导致地球环境的严重恶化及以气候变暖为标志的全球变化, 包括冰川退缩、河道断流、湖泊萎缩、沙漠化加剧、生物多样性受损等, 特别是干旱的发生日益频繁, 已经成为全球最为常见的自然灾害之一<sup>[1-2]</sup>。干旱作为长时间的累积过程, 是正常的气候现象。气候变暖背景下, 我国干旱呈现发生频率高、分布面积大、时空分布不均匀、持续时间长等特点<sup>[3]</sup>, 对农业生产的影响尤其严重<sup>[4]</sup>, 且农业

和农村可能是未来 50a 受全球变化影响最大的部门和地区<sup>[1]</sup>。

影响作物的干旱发生发展非常复杂, 不仅与作物本身的生物学特性有关, 包括作物品种、作物生物特性、耐旱程度、种植布局、生长状况等, 还受到气象和水文条件等自然因素、下垫面及人为管理、耕作制度的影响。

为减缓和预防干旱对作物生产带来的不良影响, 与作物密切相关的干旱指标建立非常重要。正

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951303); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903003)

收稿日期: 2012-10-20; 修订日期: 2013-06-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

因为如此,一系列干旱指标已被建立,包括气象指标、土壤墒情指标、作物生理生态指标及其它综合监测指标等,其中较为常用的干旱指标有土壤含水量、作物水分胁迫指数和帕尔默干旱指数(PDSI)<sup>[5-6]</sup>。

为建立反映作物水分胁迫的干旱指标,本文将综述近年来国内外广泛应用的干旱指标,并分析其优劣与适用性,探讨未来反映作物水分胁迫的干旱指标研究拟重视的方面,为减缓和预防干旱对农业的不良影响及制订科学的政策提供依据。

## 1 气象指标

气象学认为,干旱是一种长期干燥少雨且稳定的气候现象,实际上是由于缺乏足够的降水引起,是气候水热不平衡的表现。自然降水是农田水分的主要来源,是造成作物水分胁迫的主要原因。因此,降水量常被用于描述干旱。

### 1.1 降水量指标

降水量指标是一种以某地某时段的降水量确定旱涝标准的定量指标,主要用于地下水位较深且无灌溉条件的雨养农业区。该指标形式多种多样,但大多数指标都是与该时期多年平均降水量进行对比获得。

#### 1.1.1 降水距平百分率

降水距平百分率指某时期降水量与同期多年平均降水量的距平百分率,反映了该时期降水量相对于同期平均状态的偏离程度,是一个具有时空对性的相对指标。

$$M_i = \frac{R_i - \bar{R}}{\bar{R}} \times 100\%$$

式中, $M_i$ 为降水距平百分率, $R_i$ 为某年某时期降水量; $\bar{R}$ 为同期多年平均降水量。该方法在我国气象部门日常业务中经常使用,基于该指标已提出了不同地区的干旱划分标准<sup>[7-8]</sup>及特定作物的气候干旱指数<sup>[9]</sup>。BMDI、RAI等均属于基于降水距平百分率的干旱指标<sup>[10]</sup>。

降水距平百分率的优点在于意义明确、方法简单直观,但是其响应慢、敏感性低,反映的旱涝程度较弱,而且该指标未考虑底墒作用,对平均值的依赖性较大,对降水时空分布不均匀地区不能确定一个统一的划分标准,即相同的指标值会对应不同程度的旱涝,如我国的西北地区<sup>[7-8]</sup>。

### 1.1.2 湿度指标

湿度指标是假设降水量为常态分布时的降水变异系数,用以表征旱涝程度,也称标准差指标<sup>[11]</sup>。湿度指标( $I$ )定义如下:

$$I = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

式中, $X$ 为某地某年的降水量; $\bar{X}$ 为该地多年平均降水量; $\sigma$ 为该地多年降水量的标准差。基于该指标的旱涝标准划分如下<sup>[11]</sup>:大旱( $I < -2.0$ )、旱( $-2.0 < I < -1.0$ )、正常( $-1.0 < I < 1.0$ )、涝( $1.0 < I < 2.0$ )、大涝( $I > 2.0$ ),但不同研究者所用的标准不同,如鞠笑生<sup>[7]</sup>给出的旱涝标准为:重旱( $I \leq -1.5$ )、大旱( $-1.5 < I \leq -0.8$ )、偏旱( $-0.8 < I \leq -0.3$ )、正常( $-0.3 < I < 0.3$ )、偏涝( $0.3 \leq I < 0.8$ )、大涝( $0.8 \leq I < 1.5$ )、重涝( $I \geq 1.5$ )。该指标的特点是简单易行,但由于其对旱涝响应太快,有时会过分夸大实际的旱涝程度。

### 1.1.3 Z 指数

Z 指数是假设降水量服从概率密度函数 Person-III 分布对降水量进行正态化处理,将降水量转化为以 Z 为变量的标准正态分布,用以表征旱涝程度:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left( \frac{C_s}{2} X_i + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6}$$

式中, $X_i$ 为降水的标准化变量, $X_i$ 的平均值为 0,方差为 1,消除了降水平均值不同而造成的影响; $C_s$ 为偏态系数,用来检验观测值是否服从正态分布,偏态系数越大,Z 指数分析结果越好,越能反映出旱涝程度<sup>[7]</sup>。

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R)^3}{nS^3}$$

式中, $n$ 为样本数; $S$ 为样本均方差。Z 指数在描述旱涝程度时需要针对不同地区进行修正,并给出了适用于不同地区的划分标准<sup>[7,12-13]</sup>。该指标计算起来较为简便,意义明确,适合在我国北部和西北部使用,同时该指标较降水距平百分率指标更符合实际情况<sup>[7-8,12]</sup>。

除以上常用指标外,与降水量有关的旱涝指标还有用于衡量与林火相关的干旱指标 Muger's Index<sup>[14]</sup>、BMDI<sup>[15]</sup>、K 指标<sup>[4]</sup>、反映干旱强度和持续时间的标准化降水指标 SPI<sup>[16]</sup>、连续无雨日

数<sup>[17]</sup>等。

降水量指标的优点在于方法简单明了、资料容易获取、意义明确,但是该类指标仅考虑了单一的降水量因子,没考虑作物、下垫面及其它相关因素的影响,考虑到降水时空分布的不均匀性,降水量指标只能大致反映干旱发生的趋势,不能准确反映某一段时间小范围内的干旱程度,也不能直接表示作物遭受干旱的影响程度。同时,由于降水时空结构复杂,局地性强,预报困难,所以降水量指标难以大尺度使用,预报未来干旱的不确定性也较大。

## 1.2 温度与降水共同影响的综合指标

温度与降水共同影响的综合指标较单一的气温或降水指标包含的应用信息更丰富。温度的高低反映了地面蒸发的多少,再结合降水量可综合反映地面水分的收支状况,从而可以间接反映作物水分收支状况。

### 1.2.1 Ped 干旱指数

Ped 干旱指数( $S$ )是指标准化气温距平与标准化降水量距平之差,可用于比较不同区域和不同年份的干旱频率与敏感度<sup>[18]</sup>:

$$S = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R}$$

式中, $\Delta T$ 、 $\sigma_T$ 分别为月均气温的距平和均方差; $\Delta R$ 、 $\sigma_R$ 分别为月降水量的距平和均方差。基于 Ped 的干旱划分为:中旱( $2 < S < 3$ )、重旱( $S > 3$ )。该干旱指数可作为短期气候预报对象,服务于未来作物对水分胁迫的预测。

### 1.2.2 德马顿(De. Martonne)干旱指标

德马顿(De. Martonne)干旱指标( $I$ )的计算公式为:

$$I = \frac{12R}{T + 10}$$

式中, $R$ 为月降水量; $T$ 为月均气温。当德马顿干旱指标( $I$ )小于 30 时,干旱开始发生<sup>[18]</sup>。由于温度与蒸发有一定关系,该指标在一定程度上考虑了水分收支情况,且资料易于获取,计算简单,在一定程度上指示了作物对水分胁迫的反应。

### 1.2.3 水热系数指标

水热系数指标( $K_w$ )是利用降水量和积温表示的干旱指标,由前苏联农业气候学家谢良尼诺夫于 1971 年提出:

$$K_w = \sum P / 0.1 \sum T \geq 10^\circ\text{C}$$

式中, $\sum P$ 、 $\sum T \geq 10^\circ\text{C}$ 分别为日均气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的降水量总和与积温。该指标虽然大多用于评价气候干旱,但是积温和降水量是作物正常生长发育的重要因子,因而也可作为作物对水分胁迫的指标。

在各种干旱类型中,气象干旱的表现最为明显直接,是其它类型干旱发生的先导<sup>[19]</sup>。由于气象指标未考虑下垫面、作物等因素的影响,所以气象指标只能大致反映出干旱发生的趋势,不能直接表示作物遭受干旱的影响程度。

## 2 土壤墒情指标

土壤墒情指土壤的湿度状况,也是反映作物对水分胁迫的最成熟的指标之一<sup>[5]</sup>。作物生长发育的水分主要靠根系直接从土壤中获取,土壤含水量是限制作物生长发育的重要因子之一,可以以土壤含水量作为作物对水分胁迫指标<sup>[20]</sup>。

### 2.1 土壤相对湿度

土壤相对湿度是指土壤含水量与田间持水量的百分比。根据土壤相对湿度( $R$ )进行干旱等级划分:无旱( $R > 60\%$ )、轻度干旱( $50\% < R \leq 60\%$ )、中度干旱( $40\% < R \leq 50\%$ )、重度干旱( $30\% < R \leq 40\%$ )、特别重度干旱( $R \leq 30\%$ )。依据土壤相对湿度划分干旱等级因作物的不同而不同。研究表明,安徽省各地作物在同等减产率的情况下,水稻受旱时的土壤相对湿度较早作作物要高<sup>[20]</sup>。

### 2.2 相对湿润度指数

相对湿润度指数( $M$ )是中国气象局 2005 年《干旱监测和影响评价业务规定》中推荐的干旱指标之一,能较好地反映土壤水分收支平衡:

$$M = \frac{P - E_a}{E_a}$$

式中, $P$ 为降水量; $E_a$ 为作物实际蒸散量,利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 修正公式与作物系数计算得到。

相对湿润指数只能计算单一时段(季、月、旬等)的土壤水分收支平衡,不能反映前期的土壤水分盈亏对研究时段水分状况的影响,也无法评定区域作物对水分胁迫的响应。由于干旱是一个累积过程,为此有研究提出复合相对湿润度指数和区域综合相对湿润度指数的干旱指标<sup>[21]</sup>。

### 2.3 土壤有效水分存储量

土壤有效水分存储量( $s$ )指存储在作物根系活动层内能被作物根系吸收的有效水分量:

$$s = 0.1(w - w_w)\rho h$$

式中, $w$ 为土壤湿度; $w_w$ 为凋萎湿度; $\rho$ 为土壤容重; $h$ 为土层厚度<sup>[22]</sup>。当土壤有效水分存储量 $s$ 小到一定程度,即土壤湿度很小不足以提供作物生长发育所需的水分,作物将会发生萎蔫。因此, $s$ 可以用于评价作物缺水状况。该指标确定的干旱范围需要根据土质、作物和生长期等具体特性决定。

土壤墒情指标是基于广泛的试验而建立,土壤墒情直接影响作物各生理过程(如气孔导度、叶水势、光合速率等)<sup>[23]</sup>。由于不同作物不同生育期所需的水分不同,使用土壤墒情指标时必须注意不同作物不同生长发育阶段所需的土壤水分下限。同时,利用土壤墒情评价作物对水分胁迫响应有其不确定性,单站土壤水分的观测资料代表性较差,目前还不能很好地评估大尺度作物对水分胁迫的响应<sup>[5]</sup>。

## 3 作物生理生态指标

作物生理生态指标主要包括作物生理指标和作物形态指标两类。作物生理指标包括利用叶片相对含水量、气孔导度、叶水势、光合速率、冠层温度、蒸腾速率、细胞汁液浓度等建立的指标;作物形态指标是指利用作物长势、长相来判断作物的缺水程度。

### 3.1 叶水势指标

叶水势指标是反映作物对水分胁迫响应程度的较好指标,它不仅能够反映气候干旱特征,还能直接反映作物生理干旱特征,因为它能定量地反映作物叶片中的水分状况,特别是在凌晨、干旱或半干旱区的9:00—12:00的叶水势对于干旱程度的反映最为明显<sup>[5,23-24]</sup>。作物受旱时,叶水势迅速下降。叶水势指标 $\psi_l$ 与蒸腾速率、大气水势和叶片气孔阻抗等因素有关:

$$\psi_l = \psi_a + T_r R_{la}$$

式中, $\psi_a$ 为大气水势,可根据气温和大气相对湿度计算; $T_r$ 为蒸腾速率( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),可利用能量平衡原理估算或 LI-6400 直接测量; $R_{la}$ 为叶气系统的水流阻力( $\text{s/m}$ ), $R_{la} = r_l + r_a$ , $r_l$ 为气孔阻抗, $r_a$ 为空气阻抗。

研究表明,叶水势指标是反映我国西北半干旱区作物对水分胁迫响应最敏感的指标<sup>[25]</sup>,并构建了基于遥感信息的叶水势估算模型<sup>[5]</sup>。不同地区、不同作物或不同生育期的叶水势临界值不同;同时,叶水势指标在水分胁迫足以影响作物生长时,充分供水作物和发生水分胁迫作物的叶水势并没有差异<sup>[23]</sup>,因此使用叶水势指标时需注意水分充足和不足的情况。

### 3.2 冠气温差指标

冠层温度是判断作物水分亏缺最敏感的指标之一<sup>[26]</sup>。冠气温差指标是以作物冠层温度与气温的差值作为判断作物对水分胁迫响应的依据。冠气温差曾被用作作物缺水状况的指标<sup>[27-28]</sup>,如采用每日13:00—15:00冠气温差累计值 $S$ 作为作物对水分胁迫响应的指标<sup>[29]</sup>:

$$S = \sum_{n=1}^N (T_c - T_a)$$

式中, $N$ 为作物冠层温度高于气温的连续天数, $n=1$ 为起始日期; $T_c$ 为作物冠层温度; $T_a$ 为离作物冠层顶层2m处的气温。当土壤水分减少到一定值时,作物冠层温度将会高于气温,连续 $N$ 天缺水后,如果 $S$ 值大于作物开始缺水的临界值 $S_0$ ,则表示作物发生干旱,且冠气温差越大,蒸腾速率也越大,缺水越多,作物受旱程度越严重。

不同作物(春小麦和棉花)的冠气温差与土壤含水量、气象因素、环境因素之间的关系不同<sup>[30-31]</sup>,冬小麦的冠气温差与产量存在很好的相关关系<sup>[26]</sup>,但冠气温差指标受大气环境影响较大,当大气蒸发力较弱时,该指标不能真实地反映作物受水分胁迫的程度<sup>[32]</sup>。

### 3.3 作物水分胁迫指数

作物水分胁迫指数(CWSI)是以冠气温差作为主要计算因子,综合考虑了太阳辐射、植物、大气等各因素对作物水分状况的影响<sup>[33]</sup>:

$$\text{CWSI} = 1 - \frac{ET_d}{ET_p}$$

式中, $ET_d$ 为作物实际蒸散发量; $ET_p$ 为作物潜在蒸散发量<sup>[34]</sup>。基于CWSI的干旱划分为<sup>[35]</sup>:重旱( $\text{CWSI} > 0.913$ )、中旱( $0.765 < \text{CWSI} < 0.912$ )、轻旱( $0.617 < \text{CWSI} < 0.764$ )、正常( $0.322 < \text{CWSI} < 0.616$ )、湿润( $\text{CWSI} < 0.321$ )。研究表明,将作物实际蒸散量替换

成自然降水提出的作物水分亏缺指数(CWDI)在我国不同区域具有较好的适用性<sup>[36]</sup>。

当引入冠气温差等计算因子后,CWSI 可计算如下<sup>[37]</sup>:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_u}{(T_c - T_a)_u - (T_c - T_a)_l}$$

$$(T_c - T_a)_l = A + B \times VPD$$

$$(T_c - T_a)_u = A + B \times VPG$$

式中,  $(T_c - T_a)$  为冠气温差, 可以通过仪器观测;  $(T_c - T_a)_l$  为作物潜在蒸发状态下的冠气温差, 是冠气温差的最小值;  $(T_c - T_a)_u$  为作物在完全没有蒸腾作用下的冠气温差, 是冠气温差的最大值; VPD 为大气饱和和水汽压差, 可以通过温度和湿度计算得到; VPG 是指温度分别  $T_a$ 、 $T_a + A$  下的空气饱和和水汽压之差; A、B 为经验系数。冠气温差的上、下限值也可根据冠层单层能量平衡阻力模式计算, 从而构成了 CWSI 的理论公式<sup>[37]</sup>。CWSI 在 0—1 之间, 值越大表示受旱程度越严重。

该指标能够很好地反映冬小麦、棉花等作物的水分胁迫状况<sup>[38-40]</sup>, 并可与遥感信息获取的大面积作物冠层温度相结合, 及时了解作物对水分胁迫响应的程度。但是, CWSI 计算过于繁琐, 在叶面积指数较低(作物生长发育早期)时应用效果较差, 利用遥感也会额外引入地表温度信息等噪音。

### 3.4 水分亏缺指数 WDI

水分亏缺指数(WDI)是以冠层温度为基础扩展而来的反映农作物旱情的重要指标之一, 是基于能量平衡双层模型建立起来的<sup>[41]</sup>:

$$WDI = \frac{(T_s - T_a) - (T_s - T_a)_m}{(T_s - T_a)_x - (T_s - T_a)_m}$$

式中,  $T_s$  为地表混合温度, 即作物和土壤的混合温度;  $T_a$  为空气温度;  $(T_s - T_a)_m$ 、 $(T_s - T_a)_x$  分别为地表与空气温差的最小值和最大值:

$$(T_s - T_a)_m = c_0 - c_1(SAVI)$$

$$(T_s - T_a)_x = d_0 - d_1(SAVI)$$

式中, SAVI 为土壤调节植被指数;  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $d_0$ 、 $d_1$  可利用植被指数-温度关系梯形(VIT 梯形)解出。WDI 越大, 表明作物受旱程度越严重。

该指标大多都利用了遥感信息, 并克服了 CWSI 的不足, 可以在叶面积指数较低时使用, 而且遥感探测到的温度信息更接近地表混合温度, 但在作物灌

溉后遥感对于地表混合温度反映的“滞后性”还不能解决<sup>[37]</sup>。

### 3.5 气孔导度指标

气孔导度指标是由水分亏缺指数(WDI)衍生而来, 反映作物对水分胁迫响应的指标, 因为 WDI 在生理上反映了叶片气孔导度与作物水分状况之间的定量关系<sup>[42]</sup>。当土壤水分亏缺, 作物发生干旱时, 作物叶片气孔部分关闭, 阻力增加, 减少蒸腾失水速率, 从而影响光合作用。干旱越严重, 气孔阻力越大, 导度越小。因此, 气孔导度是天气条件与土壤水分状况等因素综合影响的结果。气孔阻力可用 MK3 和 AP-4 气孔仪测定, 根据试验资料可建立气孔导度动态模式, 进而确定作物缺水状况。不同作物及其不同生育期的气孔导度变化不同, 对土壤水分阈值的响应也不同<sup>[23]</sup>。

研究认为, 该指标较利用蒸散量估算作物缺水状况更准确、更简单<sup>[42]</sup>, 如基于气孔导度建立的冬小麦缺水指标<sup>[37]</sup>。气孔导度是反映作物对水分胁迫响应较好的指标, 但它具有双重调节功能, 有时变化较为复杂<sup>[25]</sup>。

### 3.6 光合速率指标

光合作用是植物重要的生理活动之一, 是产生有机物质的主要源泉。水分是进行光合作用的重要原料, 光合速率大小与作物体内的水分状况有直接关系, 而作物体内的水分大部分是由根系从土壤中获取, 所以光合速率大小间接地与土壤水分状况密切相关。不同作物的光合速率对土壤水分变动的阈值响应不相同<sup>[23]</sup>。

研究表明, 玉米在轻度干旱时的光合速率会受到一定程度的抑制<sup>[43]</sup>, 而高粱、糜子等作物在轻度缺水时, 光合速率几乎不受影响, 甚至有些特定生育期的作物在轻度干旱时, 对光合速率有促进作用, 如小麦灌浆期<sup>[44]</sup>。当土壤水分低于 15% 时, 冬小麦不同生育期内的叶片光合速率随土壤水分的减小而明显降低<sup>[44]</sup>; 冬小麦的光合速率与减产率具有较强的相关性<sup>[45]</sup>, 从而为作物受旱程度的风险预测和产量监测提供了依据。

### 3.7 蒸腾速率指标

为维持作物正常生长发育的水分需求, 作物主要靠蒸腾作用将水分运输到作物的各器官中去。当作物发生干旱时, 作物将会自动调节自身的蒸腾速

率以减少水分亏缺,干旱越严重,蒸腾速率也越小。研究表明,作物蒸腾速率变化对土壤水分含量有明显的阈值反应<sup>[23,44]</sup>;当水分下降到植株有效水分的25%—30%时,蒸腾速率开始显著降低<sup>[44]</sup>。

### 3.8 叶绿素指标

叶绿素含量是显示作物健康程度的生理生化指标。当作物发生干旱时,作物健康程度受影响。随着植物生育期进程,叶绿素含量呈现先增大后减小的趋势,这是由植物自身的生理特征决定的。作物缺水时,叶绿素含量不会呈现单一的增加或降低的趋势。

研究表明,冬小麦中度缺水时叶绿素含量最大,严重水分胁迫时叶绿素含量最低,轻度缺水则处于居中位置,并且在严重缺水时,叶绿素含量随生育期进程变化非常缓慢<sup>[45]</sup>。玉米叶片的叶绿素合成也对水分感应较为敏感,对土壤水分含量也存在明显的阈值反应,但该指标与作物减产率的相关性较低,所以该指标最好作为一个辅助指标使用<sup>[46]</sup>。

同时,用于反映作物对水分胁迫响应的作物生理生态指标还有伤流量指标、胞汁液浓度指标等<sup>[47]</sup>。作物生理生态指标是最能直接反映作物受旱程度的指标,但是作物形态指标常为定性指标,带有一定的主观性,而作物生理指标大都是在田间取植株或叶片进行测定,不同测定时间、不同叶龄、不同叶位的测定结果存在差异,所以取样的代表性很关键,该类指标更适于小范围的作物旱情监测<sup>[32,48]</sup>。

## 4 其它监测指标

### 4.1 作物供需水指标

作物供需水指标是指在大气-土壤-作物系统中从农作物的水分供需变化出发,以农田水量平衡为依据,通过田间试验及现有文献资料的统计分析,综合考虑研究时段内降水、地下水利用、灌溉水量、作物需水量等供水和需水因素,提出的能合理反映农作物旱象、旱情的一种综合性指标。

陕西省作物旱情预报系统就是从作物旱情测报出发提出的反映作物受旱程度的作物供需水指标  $K_d$ <sup>[49]</sup>:

$$K_d = \frac{P}{W} = \frac{P_0 + G + (W_1 - W_0) + I}{(W_2 - W_0) + ET}$$

式中,  $P$  为有效供水量 (mm);  $W$  为作物需水量

(mm);  $P_0$  为时段内有效降水量 (mm);  $G$  为时段内地下水利用量 (mm);  $W_0$ 、 $W_1$ 、 $W_2$  分别为作物根系活动层内土壤凋萎含水量 (mm)、时段初期土壤含水量 (mm)、时段末期土壤含水量 (mm);  $I$  为时段内灌溉水量 (mm);  $ET$  为时段内充分供水时的作物需水量 (mm)。据此提出的陕西省作物供需水指标  $K_d$  为<sup>[49]</sup>: 偏涝 ( $K_d > 1.3$ )、正常 ( $1.3 \geq K_d > 0.8$ )、轻旱 ( $0.8 \geq K_d > 0.6$ )、中等干旱 ( $0.6 \geq K_d > 0.4$ )、重旱 ( $0.4 \geq K_d > 0$ )、极端干旱 (作物凋萎、死亡) ( $K_d = 0$ )。

该指标涉及多种水分因子,物理概念明确,所需参数可利用气象资料、实验资料或计算求得,实际应用效果较好。

### 4.2 减产百分率模型指标

减产百分率模型指标 ( $L$ ) 是以不同生育阶段水分亏缺对作物产量影响,综合确定的作物对水分胁迫响应的指标:

$$L = \left(1 - \frac{Y}{Y_m}\right) \times 100\% = \left[1 - \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)^{\lambda_i}\right] \times 100\%$$

式中,  $Y$  为实际产量;  $Y_m$  为使用作物光温生产潜力计算的最大产量;  $n$  为作物的生育阶段;  $\lambda_i$  为作物在第  $i$  阶段的水分敏感系数,反映不同生育期缺水对作物产量的影响程度;  $ET_a$  为实际耗水量;  $ET_m$  为最大耗水量。据此,给出的冬小麦干旱指标为<sup>[50]</sup>: 轻旱 (减产 10% 以下)、中旱 (10%—20%)、重旱 (20%—30%)、严重干旱 (大于 30%)。该指标对产量预报具有重要意义。

### 4.3 农作物水分综合指标

农作物水分综合指标  $D$  计算如下:

$$D = \frac{P - R_e + \rho_0/\rho_g + R_g}{E_0 + \rho_m/\rho_g}$$

式中,  $P$  为作物生长期内的降水量;  $R_e$  为无效降水量,即径流量与深层渗漏量之和;  $\rho_0$  为作物生长初期根系层的平均土壤含水量;  $\rho_g$  为根系层内 1mm 降水量引起土壤含水量的增加量;  $R_g$  为同时段地下水补给量;  $E_0$  为作物生长期内的潜在蒸发量;  $\rho_m$  为作物正常生长发育所要求的适宜土壤含水量。据此,给出的农作物水分综合指标  $D$  划分为: 水分过多 ( $D > 1.3$ )、正常 ( $0.8 < D < 1.3$ )、半干旱 ( $0.5 < D < 0.8$ )、干旱 ( $D < 0.5$ )。该指标在我国旱作农业区应用较广泛<sup>[22]</sup>,但有些因子,如径流量较难计算,对该指标的推广应用造成了一定的困难。

#### 4.4 PDSI 干旱指标

帕尔默干旱指标 PDSI 是以土壤水量平衡为依据,综合考虑水文循环的各项因子(如降水、蒸散、径流等)及相应影响作物对水分胁迫响应的权重系数,是一种被广泛应用于评估作物旱情的综合性干旱指标<sup>[51]</sup>:

$$PDSI = k_i d$$

$$d = P - P_0 = P - (\alpha_i PET + \beta_i PR + \gamma_i PRO - \delta_i PL)$$

$$K_i = 17.67K' / \sum DK'$$

$$K' = 1.51g \{ [(PET + R + RO)/(P + L) + 2.8] / D \} + 0.5$$

式中, $P$  为实际降水量; $P_0$  为气候适宜的降水量; $PET$ 、 $PR$ 、 $PRO$ 、 $PL$  分别为可能的蒸散量、土壤水补给量、径流量、损失量; $R$ 、 $R_0$ 、 $L$  分别为实际的土壤水补给量、径流量、损失量; $D$  为各月水分距平  $d$  的绝对值的平均值; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  分别为各项对应的权重系数,其值取决于研究区域的气候特征。该指标被广为应用并修正,如基于 PDSI 的适于较大空间尺度的作物水分指标 CMI<sup>[52]</sup>、自适应帕默尔干旱指数(SC-PDSI)<sup>[53]</sup>、修正帕尔默干旱指数(MPDSI)<sup>[54-55]</sup> 和适于中国的帕尔默干旱指数<sup>[56-57]</sup>。

PDSI 指标是迄今为止应用最广泛、最成功、最具突破性进展的干旱指标,基本上能描述干旱发生、发展直至结束的全过程,具有较好的时间、空间可比性,但该指标考虑因子较多,对资料条件要求高,计算也过于繁琐,具有较大的任意性,无法实现逐日作物对水分胁迫响应的监测<sup>[6,19,21,58]</sup>。

#### 4.5 干旱经济计量指标

干旱经济计量指标是以作物产量、收益、价格、粮食供需情况等经济因子来评估干旱影响程度的指标,如在尼日利亚的干旱区,采用供给响应函数作为主要粮食作物小米对水分胁迫响应的指标<sup>[59]</sup>:

$$Q_{mt} = \alpha_0 + \alpha_1 RAIN_t + \alpha_2 (RAIN_t)^2 + \alpha_3 P_{mt-1} + \alpha_4 P_{st-1} + \alpha_5 T + U_t$$

式中, $Q_{mt}$  为  $t$  时段小米产量; $RAIN_t$  为  $t$  时段降水指数,即该时段降水量与多年平均降水量之比; $P_{mt-1}$  为剔除通货膨胀后上一年的小米价格; $P_{st-1}$  为剔除通货膨胀后上一年的高粱(竞争粮食作物)价格; $T$  是由于生产技术改变而产生的时间趋势项; $U_t$  为  $t$  时段随机误差; $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$  为各项对应的参数估计。降水量越少,干旱越严重,小米产量越低,供给量则

越少。研究表明<sup>[59]</sup>,降水量减少 1%,小米产量将降低 0.45%。

干旱经济计量指标考虑了人文、环境、社会等非农业因素,不能直接反映作物的实际干旱程度,同时,该指标滞后性大,对实际应对农业干旱效果不显著。

#### 4.6 遥感干旱监测指标

随着地面遥感、卫星遥感、雷达遥感、微波遥感等多种遥感手段的增加,为作物旱情监测开辟了一条新途径。目前,遥感干旱监测从温度、土壤水分、作物长势等角度,建立了基于水分平衡和能量平衡的多种监测模型,主要利用方法有热惯量法、蒸散法、植被指数法、微波遥感法等<sup>[35]</sup>。同时,基于作物光谱信息可反映作物的水分状况<sup>[60]</sup>。

遥感技术为作物水分胁迫指数 CWSI、水分亏缺指数 WDI 等干旱指标的计算与资料获取提供了方便,可实现长时期、大范围的动态干旱监测<sup>[61]</sup>,但是遥感信息的“滞后性”问题有待进一步解决。

### 5 问题与展望

国内外科学家已就干旱指标开展了大量研究,具有代表性的气象指标、土壤墒性指标和作物生理生态指标分别从大气干燥程度、土壤供水能力和作物耐旱能力方面描述了作物的缺水程度;而且各类干旱指标都具有一定的时间与空间尺度范围<sup>[62]</sup>,还不能综合反映不同地区的自然条件、下垫面、作物品种、人类活动等因素影响,都具有一定的局限性。迄今为止,还没有建立起一个可用于作物对水分胁迫响应的业务服务指标即作物干旱,更没有将作物干旱与其光合能力联系起来进行作物干旱分级,制约着减缓和预防干旱对农业不良影响的科学政策与措施的制定。

为此,迫切需要开展作物干旱监测预警及评价关键技术的研究。通过分析主要作物不同生育期对不同等级气象干旱与土壤水分及其持续时间响应的生物学特征,揭示作物干旱对气象干旱与土壤干旱的响应特征与关系;建立作物对气象干旱与土壤干旱响应的生物学指标体系、作物干旱与土壤水分关系模型及作物干旱与气象干旱关系模型;结合遥感监测信息,完善作物干旱的遥感监测指标;研发耦合遥感信息的作物干旱监测指标体系及作物干旱等级

划分与灾损评估技术,开发作物干旱监测预警及评估业务系统,以科学地制定作物应对干旱的对策措施,确保作物稳产高产。

#### References:

- [ 1 ] He Q D, Hui D Y, Wu W S, Ming W S, Rong D G, Da L E, Zhen L C, Xiang S Z, Nan S H, Rong W S, He W G. Ecological and environmental change in west China and its response strategy. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(3): 314-319.
- [ 2 ] Lashkari A, Bannayan M. Agrometeorological study of crop drought vulnerability and avoidance in northeast of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012.
- [ 3 ] Li M S, Li S, Li Y H. Studies on drought in the past 50 years in China. *Agricultural Meteorology*, 2003, 24(1): 8-11.
- [ 4 ] Zhang Q, Gao G. The spatial and temporal features of drought and flood disasters in the past 50 years and monitoring and warning services in China. *Science & Technology Review*, 2004 (7): 21-24.
- [ 5 ] Zhang J, Zhang Q, Zhao H, Zhang P L. Theory and application of leaf water potential retrieved from remote sensing. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(6): 916-923.
- [ 6 ] Tatli H, Türkes M. Empirical Orthogonal Function analysis of the palmer drought indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011 (151): 981-991.
- [ 7 ] Ju X S, Yang X W, Chen L J, Wang Y M. Research on determination of station indices and division of regional flood/drought grades in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 08(1): 26-33.
- [ 8 ] Zhang C J, Wang B L, Liu D X, Cai Z L. Research on drought and flood indices in the northwest China. *Plateau Meteorology*, 1998, 17(4): 381-389.
- [ 9 ] Wu D L, Wang C Y, Zhang X F, Xue H X. Study on the crop climate drought index of winter wheat in north China. *Science & Technology*, 2009, 27(7): 32-36.
- [ 10 ] Zhou X K, Zhang Q, Wang Y M, Gao G. Drought indices and operational drought monitoring in the U. S. A. and China. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(7): 6-9.
- [ 11 ] Xu E H. Theory of annual precipitation normality. *Acta Meteorologica Sinica*, 1950, 21(1/4): 17-34.
- [ 12 ] Wang Z W, Zhai P M, Zhang H T. Variation of drought over northern China during 1950—2000. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 480-487.
- [ 13 ] H Ding, D Liu, T Li. Model of projection pursuit drought evaluation based on improved artificial fish swarm algorithm of Sanjiang Plain. *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 2010 International Conference on, 2010. 1908-1911.
- [ 14 ] Munger, Thornton T. Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Monthly Weather Review*, 1916, 44(11): 642-643.
- [ 15 ] Bahlme H N, Mooley. Large scale drought/flood and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 1980, 108: 1197-1211.
- [ 16 ] Pai D, Sridhar L, Guhathakurta P, Hatwar H. District-wide drought climatology of the southwest monsoon season over India based on standardized precipitation index (SPI). *Nat Hazards*, 2011, 59(3): 1797-1813.
- [ 17 ] Justino F, de Mélo A S, Setzer A, Sismanoglu R, Sediyaama G C, Ribeiro G A, Machado J P, Sterl A. Greenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. *Climate Change*, 2011, 106(2): 285-302.
- [ 18 ] Koleva E, Alexandrov V. Drought in the Bulgarian low regions during the 20th century. *Theoretical Applied Climatology*, 2008, 92(1): 113-120.
- [ 19 ] Yuan W P, Zhou G S. Theoretical study and research prospect on drought indices. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(6): 982-991.
- [ 20 ] Tang G M, Jiang S M. Drought index and drought prediction for rice. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(8): 54-58.
- [ 21 ] Feng J S, Wang J Y, Wang X T, Xue X P, Chen C Y, Li H Y, Fan L J. The application of relative humidity index to agricultural drought monitoring. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2011, 22(6): 766-72.
- [ 22 ] Yao Y B, Zhang C J, Deng Z Y, Dong A X, Zhang X Y, Wei F, Yang J H. Overview of meteorological and agricultural drought indices. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(1): 185-189.
- [ 23 ] Zhang X Y, Pei D, You M Z. Response of leaf water potential, photosynthesis and stomatal conductance to varying soil moisture in four crops: winter wheat, corn, sorghum and millet. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 280-283.
- [ 24 ] Kramer P J. An early discussion of cell water relation in thermodynamic terminology. *Plant, Cell & Environment*, 1985, 8(3): 171-172.
- [ 25 ] Zhang J, Zhang Q, Zhao J H, Wang S, Zhao H, Wang J. The response of three crop drought indices to spring wheat water stress over semi-arid region in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1646-1654.
- [ 26 ] Chen S L, Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, Pei D. Variation and interrelationship of winter wheat canopy-air temperature difference, leaf water potential and crop water stress index under different water supply conditions. *Acta Tritical Crops*, 2005, 25(5): 38-43.
- [ 27 ] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, Ehler W L. Crop temperature reveals stress. *Crops and Soils*, 1977, 29(8): 10-13.
- [ 28 ] Idso S B, Jackson R D, Reginato R J. Remote-sensing of crop yields. *Science*, 1977, 186: 19-25.
- [ 29 ] Dong Z G. Research on soil moisture index. *Meteorological*

- Monthly, 1985(1).
- [30] Cai H J, Xiong Y Z, Liu H J. Diagnosis of crop water deficit by canopy — air temperature Difference. *agricultural research in the Arid areas*, 1993, 11(3): 49-54.
- [31] Ehrler W L. Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agronomy Journal*, 1973, 65(3): 404-409.
- [32] Liu X Y, He W P, Zhang J. Drought indicators and their applications in field scale. *Agricultural Meteorology*, 2005, 26(2): 99-105.
- [33] Idso S B, Reginato R J, Reicosky D C, Hatfield J L. Determining soil-induced plant water potential depressions in alfalfa by means of infrared thermometry. *Agronomy Journal*, 1981, 5(73): 826-830.
- [34] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, J Printer P J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 1981, 17(4): 1133-1138.
- [35] Li J R. Method and advances of drought monitoring by remote sensing. *Hydrology*, 2001, 21(4): 15-17.
- [36] Qi S H, Zhang Y P, Niu Z, Wang C Y, Zhen L. Application of water deficit index in drought monitoring in China with remote sensing. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 367-372.
- [37] Yuan G F, Tang D Y, Luo Y, Yu Q. Advances in canopy-temperature-based crop water stress research. *Advanced in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 49-54.
- [38] González-Dugo M, Moran M, Mateos L, Bryant R. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrigation Science*, 2006, 24(4): 233-240.
- [39] Yuan G F, Luo Y, Shun X M, Tang D Y. Winter wheat water stress detection based on canopy surface temperature. *transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2002, 18(6): 13-17.
- [40] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management*, 2001, 47(1): 69-75.
- [41] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, Vidal A. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263.
- [42] Kang S Z, Xiong Y Z. Discriminant method for crop water status and irrigation index research. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991(1): 34-39.
- [43] Wang J S. Effects of water stress on the physiological and ecological characteristics of maize [ D ]. Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2004.
- [44] Chen Y M, Shun J S, Xiao J F. A study on the soil moisture controlling standard of water saving irrigation. *Irrigation and Drain*, 1997, 16(1): 25-29.
- [45] Cong J O, Li N, Xu Y J, Gu W, Le Z Y, Huang S Q, Xi B, Lei Y. Relationship between indices of growth, physiology and reflectivity and yield of winter wheat under water stress. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 67-71.
- [46] Zhang S Y, Guo J, Liu W, Zhao J K, Gu S Y. Responses of mainphysiological and biochemical indexes of maize leaf to soil moisture at seedling stage. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(5): 68-72, 77.
- [47] Liu Y Z, Li Q X, Shun W R, Jing K P, Wang G Q, Li W X. Dry target system of the climate and the crop. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2005, 33(3): 50-53.
- [48] Han M Z, Yang F, Wang Z B. Review of common agricultural drought index. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(6): 681-682.
- [49] Wang M X, Hu Y H, Xiong Y Z. Study on the crop drought forecasting system in Shanxi Province. *Northwest Water Resources & Water Engineering*, 1996, 07(2).
- [50] Kang X Y, Gu G Q, Shi Y S, Tian G Q, Gu Y L. Drought indices and prediction models for winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 17(4): 860-865.
- [51] Palmer W C. *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45. Office of Climatology U.S. Weather Bureau, Washington, 1965.
- [52] Pamler W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 1968, 21: 156-161.
- [53] Wells N, Goddard S, Hayes M J. A self-calibrating palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 2004, 17(15): 2335-2351.
- [54] Mo K C, Chelliah M. The modified Palmer Drought Severity Index based on the NCEP north American regional reanalysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2005, 45(10): 1362-1375.
- [55] Ye J G, Shen S H, Lü H Q. Application of modified Palmer Drought Severity Index in agricultural drought monitoring. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 257-261.
- [56] Liu W W. Further modification and application of the Palmer Drought Severity Model [ D ]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2003.
- [57] Zhai J Q, Su B, Krysanova V, Vetter T, Chao G, Tong J. Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in 10 Large regions of China. *Journal Climate*, 2010, 23: 649-663.
- [58] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, Hayes. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80: 429-438.
- [59] Abdullahi A B, Iheanacho A C, Ibrahim A. Econometric analysis of the relationship between drought and millet production in the arid zone of Nigeria: A case study of Borno and Yobe States. *Journal of Agriculture & Social Sciences*, 2006, 2(3): 170-174.
- [60] Zhang J H, Yao F M, Li L, Zhang W Z. Relationships between

water indices and soil moisture/crop physiological indices using ground-based remote sensing and field experiments. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 151-155.

- [61] Tan D B, Liu L M, Yan J J, Hu Y. Research on drought monitoring model based on MODIS data. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(3): 11-15.
- [62] Richard R, Heim Jr. A review of twentieth-century drought index used in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1165.

#### 参考文献:

- [1] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 王苏民, 董光荣, 林而达, 刘春葵, 余之祥, 孙惠南, 王守荣, 伍光和. 中国西部生态环境变化与对策建议. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314-319.
- [3] 李茂松, 李森, 李育慧. 中国近 50 年旱灾灾情分析. 中国农业气象, 2003, 24(1): 8-11.
- [4] 张强, 高歌. 我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务. 科技导报, 2004(7): 21-24.
- [5] 张杰, 张强, 赵宏, 张平兰. 定量遥感反演作物水势的原理及其应用. 生态学杂志, 2008, 27(6): 916-923.
- [7] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 王有民. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究. 应用气象学报, 1997, 08(1): 26-33.
- [8] 张存杰, 王宝灵, 刘德祥, 蔡忠兰. 西北地区旱涝指标的研究. 高原气象, 1998, 17(4): 381-389.
- [9] 吴东丽, 王春乙, 张雪芬, 薛红喜. 华北冬小麦作物气候干旱指数研究. 科技导报, 2009, 27(7): 32-36.
- [10] 邹旭恺, 张强, 王有民, 高歌. 干旱指标研究进展及中美两国国家级干旱监测. 气象, 2005, 31(7): 6-9.
- [11] 徐尔灏. 论年雨量之常态性. 气象学报, 1950, 21(1-4): 17-34.
- [19] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.
- [20] 汤广民, 蒋尚明. 水稻的干旱指标与干旱预报. 水利水电技术, 2011, 42(8): 54-58.
- [21] 冯建设, 王建源, 王新堂, 薛晓萍, 陈艳春, 李鸿怡, 范里驹. 相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用. 应用气象学报, 2011, 22(6): 766-772.
- [22] 姚玉璧, 张存杰, 邓振镛, 董安祥, 张秀云, 魏锋, 杨金虎. 气象、农业干旱指标综述. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 185-189, 211.
- [23] 张喜英, 裴冬, 由懋正. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应. 植物生态学报, 2000, 24(3): 280-283.
- [25] 张杰, 张强, 赵建华, 王胜, 赵宏, 王静. 作物干旱指标对西北半干旱区春小麦缺水特征的反映. 生态学报, 2008, 28(4): 1646-1654.
- [26] 陈四龙, 张喜英, 陈素英, 孙宏勇, 裴冬. 不同供水条件下冬小麦冠气温差、叶片水势和水分亏缺指数的变化及其相互关系. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 38-43.
- [29] 董振国. 对土壤水分指标的研究. 气象, 1985(1).
- [30] 蔡焕杰, 熊运章, 刘海军. 用冠层温度-气温差方法诊断作物缺水状况的研究. 干旱地区农业研究, 1993, 11(3): 49-54.
- [32] 刘晓英, 郝卫平, 张健. 农田尺度下干旱指标及应用. 中国农业气象, 2005, 26(2): 99-105.
- [35] 李纪人. 旱情遥感监测方法及其进展. 水文, 2001, 21(4): 15-17.
- [36] 齐述华, 张源沛, 牛铮, 王长耀, 郑林. 水分亏缺指数在全国干旱遥感监测中的应用研究. 土壤学报, 2005, 42(3): 367-372.
- [37] 袁国富, 唐登银, 罗毅, 于强. 基于冠层温度的作物缺水研究进展. 地球科学进展, 2001, 16(1): 49-54.
- [39] 袁国富, 罗毅, 孙晓敏, 唐登银. 作物冠层表面温度诊断冬小麦水分胁迫的试验研究. 农业工程学报, 2002, 18(6): 13-17.
- [42] 康绍忠, 熊运章. 作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究. 水利学报, 1991(1): 34-39.
- [43] 王建程. 水分胁迫对玉米生理生态特性影响研究[D]. 山西: 山西农业大学, 2004.
- [44] 陈玉民, 孙景生, 肖俊夫. 节水灌溉的土壤水分控制标准问题研究. 灌溉排水, 1997, 16(1): 25-29.
- [45] 丛建鸥, 李宁, 许映军, 顾卫, 乐章燕, 黄树青, 席宾, 雷颢. 干旱胁迫下冬小麦产量结构与生长、生理、光谱指标的关系. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 67-71.
- [46] 张淑勇, 国静, 刘炜, 赵京考, 谷思玉. 玉米苗期叶片主要生理生化指标对土壤水分的响应. 玉米科学, 2011, 19(5): 68-72, 77.
- [47] 刘永忠, 李齐霞, 孙万荣, 靳鲲鹏, 王根全, 李万星. 气候干旱与作物干旱指标体系. 山西农业科学, 2005, 33(3): 50-53.
- [48] 韩明微, 杨帆, 王忠波. 农业旱情常用指标评述. 水利科技与经济, 2010, 16(6): 681-682.
- [49] 王密侠, 胡彦华, 熊运章. 陕西省作物旱情预报系统的研究. 西北水资源与水工程, 1996, 07(2).
- [50] 康西言, 顾光芹, 史印山, 田国强, 谷永利. 冬小麦干旱指标及干旱预测模型研究. 中国生态农业学报, 2011, 17(4): 860-865.
- [55] 叶建刚, 申双和, 吕厚荃. 修正帕默尔干旱指数在农业干旱监测中的应用. 中国农业气象, 2009, 30(2): 257-261.
- [56] 刘巍巍. 帕默尔旱度模式的进一步修正及其应用[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003.
- [60] 张佳华, 姚凤梅, 李莉, 张文宗. 基于遥感和地面试验的水分指数与土壤湿度及生理指标关系. 农业工程学报, 2010, 26(4): 151-155.
- [61] 谭德宝, 刘良明, 鄢俊洁, 胡艳. MODIS 数据的干旱监测模型研究. 长江科学院院报, 2004, 21(3): 11-15.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Advance in the study on drought index ..... LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops .....  
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem .....  
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web .....  
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China .....  
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining .....  
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the  
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ..... ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill  
sludge ..... CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

**Autecology & Fundamentals**

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi .....  
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* ..... XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil .....  
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy .....  
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice .....  
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress .....  
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices .....  
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses ..... LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...  
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents .....  
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant  
plants and soil in alpine meadow ..... LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)

Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses ..... XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

### Population, Community and Ecosystem

The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ..... ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)

Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ..... ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)

The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ..... ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)

Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland ..... LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)

Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China ..... LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

### Landscape, Regional and Global Ecology

The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation ..... GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)

Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years ..... MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)

Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought ..... LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)

Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 ..... DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

### Resource and Industrial Ecology

The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ..... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 象伟宁 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 34 卷 第 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 34 No. 5 (March, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元