

农田生态系统水分循环与作物水分关系研究*

谢贤群

(中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘 要 通过对我国不同类型农田生态系统水分循环与作物生产力关系的网络研究,探讨了我国主要类型地区小麦、玉米、大豆等几种主要作物的蒸散耗水和需水规律、水分利用效率和作物水分生产函数,获得这些地区主要作物耗水需水特征及小麦水分生产函数。结果表明,在不同生态系统优化结构模式中作物与水分关系均得到极大改善,节约了作物用水,提高了作物产量和水分利用效率。

关键词 农田生态系统 需水耗水 作物水分关系

A study on water cycle in agro-ecosystem and relationship between crops and water. XIE Xian-Qun (Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101), *CJEA*, 2001, 9(1): 9~12

Abstract Based on the network researches of the relationship between water cycle and crop productivity of agro-ecosystem in different ecological type regions in China, the water requirement and consumption characteristics of some crops (wheat, corn, soybean, etc.), crop water use efficiency (WUE) and the crop-water productivity function were investigated. The results showed that there were great improvements in relationship between water and crops in different optimized agro-ecosystem models. The water used by crops was saved, yield and water use efficiency of crops were increased.

Key words Agro-ecosystem, Water requirement and consumption, Relationship between crops and water

水是农作物生长发育不可缺少的重要条件之一,是作物吸收各种矿物营养元素的传输载体,且作物的一切生理生化反应均在水的参与下才能完成。水对作物产量的影响主要表现在对光合作用和呼吸作用的影响上,作物生长发育过程中光合作用直接耗用的水分不足农作物耗水量的1%,99%以上的水分由于作物蒸腾和棵间土壤蒸发所消耗。前者经过作物气孔扩散而进入大气中,后者则直接由土壤和植物体表扩散而进入大气。因此,农作物总蒸散(包括作物蒸腾和棵间蒸发)成为评价作物生长发育过程中用水是否科学、是否经济的依据。目前世界上研究农作物最高水分利用效率的小面积实验结果是高粱每kg干物质的耗水量为300kg,小麦为550~600kg,玉米为350~400kg,这些数据一般条件下难以达到,但它为节约用水、合理用水和提高农作物水分利用效率展示了美好的前景。作物水分吸收和散失是发生在土壤-作物-大气连续体(SPAC)中一个非常复杂的动态过程。土壤性质决定着水分吸收、贮存、转换与受水势制约的水分流动;植物群体与个体特性包括遗传生理生态特征、群体结构特征(即植物群体地上与地下部分、枝、根系的空间分配特征);环境物理特征包括气候条件,特别是近地层气象条件,这些因素及其内在联系,决定了作物需水量、耗水量和作物水分与产量的关系^[1]。植物需水量和耗水量是作物水分利用的关键,关系到作物生产效能和资源利用效益,是国民经济建设特别是农业发展、生态环境保护的重要问题。我国不同自然区域的植物水分特性既有共同规律性,又有区域性差异,深入研究和科学揭示这些规律将为合理有效利用水分资源,达到作物节水高产提供科学依据和途径。目前我国一些主要生态类型地区,如西北干旱地区、黄土高原半干旱地区和华北平原半湿润地区都不同程度存在缺水、缺肥和灌溉不合理等问题,这不但限制了单位面积作物产量的提高,也造成了一些环境问题。如华北平原是我国主要粮食生产区,由于水分不足和土壤盐渍化使其大面积农田低产,若解决水分不足和防止盐渍化就要进行合理浇灌;黄土高原土层很厚有利于农业生产,但因水肥不足而严重影响作物产量,合理施肥和改进耕作制度是该区旱作农业的一项重要措施;西北干旱区光热资源丰富,只要解决作物用水问题,产量则可大幅度提高,这些问题可以通过研究不同类型地区作物的需水规律和因地

* “九五”中国科学院重大项目(KZ951-A1-301)和特别支持项目(KZ95T-04-01)及国家自然科学基金重大项目(49890330)部分研究内容
收稿日期:2000-08-03 改回日期:2000-08-21

制宜采用各种不同耕作管理措施来解决。“九五”期间由中国科学院支持的重大项目(KZ951-A1-301)和特别支持项目(KZ95T-04-01)“生态系统生产力形成机制与可持续性研究”把农田生态系统水分、养分循环与生产力关系研究及优化模式建设列为重要课题,组织中国科学院生态系统研究网络所属的16个农业生态试验站按照总体计划方案统一进行了试验研究,历经4年获得了大量试验研究数据资料,本文着重阐述了我国主要类型地区不同农田生态系统中作物需水耗水规律、水分利用效率及作物水分生产函数试验结果,以探求主产粮区各种农田生态系统模式中水分功能与作物生产力关系的规律。

1 试验设计与研究方法

1.1 田间试验设计

为寻求我国不同类型区农田生态系统中水分功能与作物生产力关系的规律,在中国科学院生态系统研究网络所属的16个农业生态试验站进行典型农田水分平衡和水量转换与生产力关系的田间综合试验研究,田间综合试验分北方地区和南方地区两大片,北方地区片包括东北松嫩平原的中国科学院海伦农业生态试验站(海伦站)、东北三江平原的中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站(三江站)、东北下辽河平原的中国科学院沈阳农业生态试验站(沈阳站)、华北太行山前平原的中国科学院栾城农业生态系统试验站(栾城站)、黄淮海平原的中国科学院封丘农业生态试验站(封丘站)和中国科学院禹城综合试验站(禹城站)、黄土高原的中国科学院安塞水土保持综合试验站(安塞站)和中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(长武站)、农牧交错带的中国科学院奈曼沙漠化研究试验站(奈曼站)、干旱荒漠绿洲的中国科学院阜康荒漠生态试验站(阜康站)和中国科学院沙坡头沙漠科学试验站(沙坡头站),南方地区片包括红壤丘岗区的中国科学院鹰潭红壤生态试验站(鹰潭红壤站)及中国科学院千烟洲红壤丘陵试验站(千烟洲站)和中国科学院桃源农业生态试验站(桃源站)、长江三角洲地区的中国科学院常熟农业生态试验站(常熟站)、长江中上游紫色土丘陵区的中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(盐亭站)。北方地区水分是制约作物产量形成的主要限制因子,为了研究水分与生产力形成的关系,北方地区片各农业生态试验站按照各自的农田生态系统结构模式,采取不同耕作措施和水分调节处理,用水量平衡法、波文比-能量平衡法或大型蒸发渗漏仪及小气候记录仪等对作物耗水量与需水量、作物生理生态指标、小气候要素和土壤水分状况等进行测量,分别建立水分-环境-作物产量试验模式,研究作物需水量和耗水量、水分利用效率及水分与产量的关系。其田间试验设计一般设3个水分水平处理,即湿润处理(田间持水量的75%以上)、正常水分处理(田间持水量的65%~70%)和自然降水处理。试验作物有小麦、玉米、大豆(或谷子、水稻,视不同类型区主要代表作物而定)。观测项目为水分观测(灌水量和降水量)、土壤湿度(用中子水分仪测量)、小气候观测(用自动小气候梯度仪记录)、作物生理生态观测、大型蒸发渗漏仪的农田蒸散量观测;南方地区片各农业生态试验站根据所在的类型区作物与水分关系特点,如夏季伏旱、季节性干旱等,参考上述北方地区各农业生态试验站的田间试验内容,由各站自行进行田间水分处理设计。

1.2 农田蒸散耗水量的测定与计算方法

农田蒸散耗水量的测定与计算方法采用大田水量平衡法、波文比-能量平衡法和大型蒸发渗漏仪法。大田水量平衡法^[2]计算公式为:

$$P+I+E_g=R_f+P_e+P_i+E_T\pm\Delta\omega \quad (1)$$

式中, P 为降水量, I 为灌溉量, E_g 为地下水补给土壤的水量, R_f 为地表径流量, P_e 和 P_i 为因降水和灌溉产生的地下水补给量, E_T 为观测时段内的农田蒸散量, $\Delta\omega$ 为观测时段内的土壤水分变化量。若在其观测时段内无降水且地下水埋深较深时,则(1)式中 P 、 E_g 、 R_f 、 P_e 和 P_i 均为零,该时段内农田蒸散量为 $E_T=I\pm\Delta\omega$ 。

波文比-能量平衡法利用安装在各农业生态试验站的自动小气候观测系统采集的农田冠层净辐射、土壤热流量、二层温度和湿度资料,采用波文比-能量平衡法测定计算农田蒸散耗水量,波文比-能量平衡法估算农田蒸散量的理论基础是下垫面能量平衡和湍流扩散理论,其计算公式为:

$$LE=\frac{R_n-G}{1+\frac{C_p \times P \times \Delta T}{\epsilon \times L \times \Delta e}} \quad (2)$$

式中, LE 为农田蒸散潜热通量(L 为汽化潜热, E 为农田蒸散量), R_n 为农田净辐射通量, G 为空气定压比, P 为大气压力, ΔT 、 Δe 分别为两个高度上的空气湿度、温度差。

大型蒸发渗漏仪法即用中国科学院生态系统网络(CERN)所属有关农业生态试验站安装的中国科学院

地理研究所自行研制的大型原状土称重式蒸发渗漏仪(Lysimeter)进行测量,该仪器土柱表面积为 3m^2 ,深度 $2\sim 2.5\text{m}$,可称重 $12\sim 15\text{t}$,其称重系统测量精度高达 50g ,即可精确称量相当于 0.02mm 水层的变化,是1种精度较高的直接测量农田蒸散量仪器^[5]。各农业生态试验站根据各自试验田特点,分别应用上述3种方法测定和计算了不同作物的农田蒸发耗水量。为估算作物需水量,本研究课题组还建议各农业生态试验站采用联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman公式计算农田潜在蒸发量。作物水分利用效率计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (3)$$

式中, WUE 为水分利用效率($\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$), Y 为作物经济产量(kg/hm^2), ET 为农田蒸散耗水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 我国不同类型区主要作物需水量、耗水量及水分利用效率

试验结果表明,我国主要类型地区主要作物需水量在不同类型地区表现均大致相同,平均为 $450\sim 500\text{mm}$ 。由于各地区处于不同自然地理带,湿润状况不同,因而小麦的缺水状况也各异。如松嫩平原农田黑土区种植的春小麦生育期为 $4\sim 8$ 月上旬,而其生育前期 $4\sim 5$ 月为干旱少雨季节,后期为雨季,总的来说,仅靠自然降水的旱作小麦生育期内缺水 $200\sim 250\text{mm}$,只能依靠土壤中贮水量补充,因此小麦产量及水分利用效率均不高,小麦产量为 $3000\text{kg}/\text{hm}^2$,水分利用效率为 $7.65\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$;黄土丘陵区冬小麦需水量为 500mm ,同期降水量仅 250mm ,二者相差 $1/2$ 的需水量靠土壤贮水补充,但黄土丘陵区冬小麦生育期正值干旱季节,冬小麦产量很低,为 $900\text{kg}/\text{hm}^2$ 左右,水分利用效率仅为 $2.10\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$;在荒漠绿洲区年降水量仅 173mm ,但冬小麦生育期需水量为 550mm ,二者相差高达 380mm ,必须依靠灌溉,才能获得收成,其水分利用效率也仅为 $7.35\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$,因此研究这3种类型地区旱作农业或灌溉农业条件下改革种植制度,改善农业生态系统结构,增大土壤贮水能力,减少灌溉中无益水分损耗,提高作物产量及水分利用效率,乃是极为重要的研究课题。而在半湿润的黄淮海平原冬小麦生育期虽处于干旱少雨季节,小麦需水量与降水量之差高达 $120\sim 180\text{mm}$,因该区属灌溉农业区,小麦产量和水分利用效率较高,分别达 $4500\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $12.0\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 以上。黄淮海平原为我国冬小麦主要产区,该区地表水和地下水资源短缺成为其农业持续发展的主要限制因子,因此深入研究如何进行计划灌溉、合理灌溉和发展节水灌溉农业,提高作物水分利用效率是该区重要课题。我国不同类型地区夏玉米主要生育期均在雨季,因此玉米的需水量与降水量之间差异不大,正常年份玉米可达到较高的产量和水分利用效率,故松嫩平原黑土区、下辽河平原、黄土丘陵区 and 黄淮海平原区均可作为我国玉米主产区。大豆生育期内各地区也是雨季,水分供应充沛,可满足大豆生长需水要求,但其籽粒水分生产利用效率并不高,仅为 $4.50\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 左右,若考虑包括茎、秆、叶等生物产量在内,其水分利用效率可达 $15.0\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ (海伦站试验资料)。因此,大豆作物应在种植密度、水肥耦合及良种培育方面深入研究,以提高其豆类产量和水分利用效率。上述资料是不同类型地区作物需水量、耗水量及水分利用效率的一般概况,而不是作物产量水平与水分关系的最佳配置。“九五”期间中国科学院生态系统研究网

表1 我国不同类型区优化模式田主要作物耗水量、产量及水分利用效率状况

Tab. 1 The crop water consumption, yield and water use efficiency in favorable model field of different ecosystem type regions in China

项 目 Items	松嫩平原海伦站 Songnen plain Hailun station			三江平原三江站 Sanjiang plain Sanjiang station		下辽河平原沈阳站 Lower liaohs plain Shenyang station		黄淮海平原禹城站 Huang-huai-hai plain Yucheng station		封丘站 Fengqiu station		栾城站 Luancheng station	
	小麦 Wheat	玉米 Corn	大豆 Soybean	大豆 Soybean	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	小麦 Wheat	玉米 Corn	小麦 Wheat	玉米 Corn	小麦 Wheat	玉米 Corn
耗水量/mm Water consumption	407.70	481.50	417.10	342.30	517.30	466.00	323.90	445.60	432.60	472.20			
降水量/mm Precipitation	227.50	524.90	535.50	353.00	635.00	266.00	376.00	210.70	162.40	110.90			
产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ Yield	4770.00	9195.00	2565.00	2250.00	8508.00	6375.00	7515.00	6017.00	8760.00	6375.00			
水分利用效率/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ Water use efficiency	11.70	19.05	6.15	6.60	17.10	13.65	23.25	13.50	20.25	13.50			
项 目 Items	黄土高原安塞站 Loessa plateau Ansa station			长武站 Changwu station		荒漠绿洲地区阜康站 Deserts & oasis regions Fukang station		沙坡头站 Shapetou station		纳曼站 Naiman station		红壤区鹰潭站 Red earth region Yingtan station	
	小麦 Wheat	玉米 Corn	谷子 Millet	小麦 Wheat	小麦 Wheat	小麦 Wheat	玉米 Corn	小麦 Wheat	玉米 Corn	小麦 Wheat	玉米 Corn	荞麦 Buck wheat	水稻 Rice
耗水量/mm Water consumption	366.20	479.40	437.00	390.00	359.00	550.00	361.10	464.60	427.00	395.00			
降水量/mm Precipitation	198.40	405.60	400.00	200.00	106.60	173.00	180.00	264.40	242.80	816.00			
产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ Yield	4669.50	11219.00	2559.00	4920.00	4155.00	7095.00	4983.00	5034.00	2763.00	5250.00			
水分利用效率/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ Water use efficiency	12.75	23.40	5.85	12.60	11.55	12.90	13.80	10.80	6.45	13.35			

络所属的16个农业生态试验站均按本项研究课题的立项要求,进行了不同的农田生态系统优化模式试验示范研究,并取得了较好的经济、社会和生态效益(见表1)。由表1可知,由于各农业生态试验站采用了各具特色的优化模式,节约了作物用水,提高了产量和作物水分利用效率,如松嫩平原的海伦站小麦、玉米、大豆的水分利用效率分别由传统大田的 $9.30\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 、 $15.15\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 和 $4.35\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 提高到 $11.70\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 、 $19.05\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 和 $6.15\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$;黄淮海平原的禹城站、封丘站的小麦水分利用效率由传统大田的 $12.0\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 提高到 $13.50\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 。

2.2 小麦水分生产函数

通过作物生育期的水分耗散与产量形成的试验研究,可获得作物产量与水分耗散的定量关系和不同地区的作物水分生产函数。对小麦而言,在我国北方地区,无论是黄淮海平原或黄土高原其作物水分生产函数规律类似,即小麦籽粒产量与其生育期总耗水量关系为二次抛物线关系(见图1),即小麦产量随着初始阶段小麦耗水量的增加而增加,但当耗水量达到某一界限值后则产量不再增加,反而呈下降趋势,同时水分利用效率也随之下降。从禹城、封丘、安塞3个农业生态试验站的试验结果看,小麦耗水量达到 $400\sim 450\text{mm}$ 即为该界限值,这个结果为节水灌溉制度的制定提供了定量依据。分析图1得出小麦水分-产量函数关系式为:

$$Y = A \times ET^2 + B \times ET + C \quad (4)$$

式中, Y 为冬小麦产量, ET 为蒸散耗水量, A 、 B 、 C 为经验系数。本试验中 A 、 B 、 C 分别为 $A = -0.0026$, $B = 2.3791$, $C = -188.61$ (禹城站); $A = -0.00373$, $B = 3.13$, $C = -310.14$ (封丘站); $A = -0.017$, $B = 13.04$, $C = -2012.2$ (安塞站)。作物水分生产函数是一个经验性的函数关系, A 、 B 、 C 经验系数随作物的种类、品种、生长状况和各地生态环境条件而变化,它不能准确地反映出作物生育与水分的内在物理关系。为此本试验设计中特别强调要加强作物生产力形成与水分关系的研究,建立不同供水条件下作物蒸散量、干物质积累、产量形成和水分利用效率的数学模型,分析不同气候类型下作物需水保证率以及不同灌溉量和灌溉方式对作物产量形成机制的关系、农田水分-光能利用- CO_2 通量-作物生产力之间的相互关系等。并应用农田生态系统中能量平衡、水量平衡和光合作用理论,揭示作物与水分的内在物理关系和利用水分生产力数学模型诊断与预测在不同供水条件下的作物生产力状况。

3 小结

通过对中国科学院生态系统研究网络所属的16个农业生态试验站的水分循环与作物生产力关系的联网研究,获得了我国主要类型地区几种主要作物的耗水需水规律和水分利用效率资料,得出这些地区主要作物的耗水需水特征及小麦的水分生产函数。从这些试验数据中可以清楚地看出在我国不同类型地区作物的需水特征大致相同,但它们的水分亏损程度却随其所处地区自然地理带及湿润状况的不同而有很大差异,此外我国北方半湿润半干旱地区的小麦水分生产函数都呈相似的二次抛物线函数形式,进而为深入揭示农田生态系统中作物与水分的内在物理关系和建立水分-养分-光能与作物生长关系综合模型,诊断和预测在不同水分条件下作物生产力状况奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 谢贤群等. 作物与水分关系研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- 2 左大康, 谢贤群. 农田蒸发研究. 北京: 气象出版社, 1991
- 3 谢贤群, 朱治林. 波文比-能量平衡法计算农田蒸发量的精度检验. 农田蒸发研究. 北京: 气象出版社, 1991
- 4 谢贤群, 左大康. 农田蒸发-测量与计算. 北京: 气象出版社, 1991
- 5 谢贤群. 农田生态系统水循环与生产力关系研究的内涵及研究战略. 地理科学进展, 1998 (17): 1~10

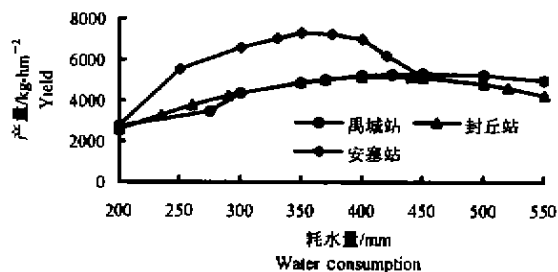


图1 冬小麦生育期耗水量与产量关系

Fig. 1 The relation between water consumption of winter wheat growth stages and crop yields