

华北平原水资源供需与作物水分利用效率指征分析*

王会肖

(中国科学院地理研究所 北京 100101)

刘昌明

(中国科学院石家庄农业现代化研究所 石家庄 050021)

摘 要 水资源短缺,地下水位大面积下降,是限制华北平原农业可持续发展的重要原因。分析研究了可持续农业水资源利用的内涵、农田水分利用效率的指征和调控指标等方面内容,为华北平原地区农业水资源高效利用及其可持续管理提供科学依据。

关键词 作物水分利用效率 水分利用率指征 华北平原

Supply and demand of water resources and analysis of crop water use efficiency in the North China Plain. Wang Huixiao (Institute of Geography, CAS, Beijing 100101), Liu Changming (Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization, CAS, Shijiazhuang 050021), *EAR*, 1999, 7(3): 11~15

Abstract The shortage of water and the falling of ground water level are important factors limiting sustainable agricultural development in the North China Plain (NCP). Researches include supply and demand of water resources in the NCP, the connotation of water resources utilization based on sustainable agriculture, indicators and their quantification of field crop water use efficiency while the regulating indicators have been analyzed. It provides scientific basis for efficient water use and sustainable management of water resources in the NCP.

Key words Crop water use efficiency, Water use indicator, North China Plain

1 华北平原水资源供需矛盾分析

华北平原指黄河下游冲积平原,包括海河与淮河平原的大部分地区,又称黄淮海平原,是我国最大的平原地带和最大的粮食生产基地之一。华北平原黄河以北地区供水紧张,人均水资源占有量、单位耕地面积平均水量分别仅有全国平均值的17%和14%。为了维持粮食与经济作物生产用水,大量开采地下水灌溉,造成地下水位大幅下降,如粮食高山的山前平原区60~80年代浅层地下水年均下降0.5m,80~90年代年均下降1.0m左右,降幅增加了1倍,造成大面积的地下水位降落区。目前农业生产是以超采过去多年贮存的地下水资源为代价维持,如不采取有效措施,浅层地下水将面临枯竭的危险,进而导致农业可持续发展的恶果。解决上述问题必须开源增补水源与节水高效用水,如能实

* ACIAR 资助中澳合作研究项目(LWR1/95/07),国家自然科学基金49871020、49801003,“九五”中国科学院重大项目(KZ951-A1-203)部分研究内容

收稿日期:1999-04-12

现南水北调向华北地区供水,则将缓解和减少城乡与工农业供水矛盾,对发展农业生产有利。但农业供水仍将得不到满足,所以解决农业用水供需矛盾不能完全立足于开源调水,而必须立足于节水、高效利用现有的农业水资源。华北平原农作物水分利用效率尚有一定潜力可挖。根据中国科学院栾城农业生态系统试验站(以下简称栾城站,代表广大山前平原高产地区)和南皮生态农业试验站(以下简称南皮站,代表广大东部低平原地区)多年作物水分利用效率试验表明,小麦水分利用效率大约为 $1.0 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。而以色列 1989 年农业用水有效性已达到 2.32 kg/m^3 ,并规划 2000 年提高到 4.31 kg/m^3 ^[7]。与以色列相比,华北平原小麦水分利用效率差距很大,仍有必要大幅度提高。因此,发展节水农业实现高效用水,是缓和供水矛盾,维持华北平原农业生产的必由之路。水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)是判别作物对水分利用状况的指标。研究水分利用效率按照作物的耗水规律进行科学精细的水分调控,是实现高效用水和可持续农业水资源管理的重要工作。

2 可持续农业水资源利用的内涵

从农业水、土资源利用,特别是农业供水角度来看,可持续农业需要为其提供可永续利用的农业水资源。首先这种资源是可再生的,因为只有可再生水资源才是可永续利用的;从农业生产方面来看,为了满足人类对粮食不断增长的需求,应不断提高农业生产水平(指产出),这就需要消耗更多的水资源,如通过超采地下水和过度引用地表水,从而引起对水资源系统可再生性的破坏。因此供水与生产必须兼顾,相互协调发展。

水资源的可再生性。自然界中的水不断循环运动,往复复始,在能量驱动下不断发生交换。若从降水开始追踪水的运行,在各种空间中水的滞留是有序的。这种滞留或贮存时间反映水的再生速率,滞留时期可称为更新周期,可用下式计算^[2]:

$$D = \frac{S}{\Delta S} \quad (1)$$

式中, D 为水的再生周期(以日或年等时间为单位), S 为水的贮存量(m^3 或 km^3), ΔS 为水体的流动量或参与水量平衡的活动量(m^3/t 或 km^3/t)。一定时间内的水量交换或再生的次数(N)为 D 的倒数,即:

$$N = \frac{1}{D} \quad (2)$$

本研究粗略计算了我国水体滞留期与交换频数指征的平均值,结果表明,大气水、河流地表水(均为世界平均值)与土壤水更新周期较短,分别为 0.027 年、0.033 年和 1 年;而地下水(500m 深度内)、湖泊水、沼泽水及冰川更新速度很慢,分别为 81 年、16 年、10 年和 823 年。因此,考虑可持续水资源的开发利用首先要研究它们的指征 D 与 N 在不同地区的具体值,然后按照研究得到的指征 D 与 N 确定科学的开发利用方式,以确保水资源的可再生性不被破坏。以华北地区地下水为例,刘昌明在 80 年代中期对地下水测龄研究结果表明,其年龄随深度而增加,地下水埋深 $< 20 \text{ m}$,年龄为 1~20 年;地下水埋深 20~30m,年龄为 6000~7000 年;地下水埋深 $> 30 \text{ m}$,年龄可大于 1 万年。当然采用 ^{14}C 法对地下水测龄,只能判断其水量组成中的古代水部分,对于可开采量来说,由于地下水中的活塞流运动,上万年的古代水是可以被利用的,可开采量的确定主要取决于地下水层的补给量。

水资源承载力指征。水资源承载力与土地承载力均指地区现有水资源量可支持人类生活与生产需求的能力。在一定意义上讲,承载力具有“以供定需”的含意。从供水能力看,不宜作小范围单一水体的计算,而应考虑区域或流域的水量转化,综合分析水量平衡各要素,按气候学规定的区域水分条件,定义的水资源量潜力(WP)是:

$$WP = P - E_0 + R \quad (3)$$

式中, P 为年均降水量, E_0 为潜在蒸发量, R 为年均径流量。由热水平衡计算的区域水分条件可用干燥指数(或湿润指数)作为指征(A),即:

$$A = \frac{E_0}{P} \quad (4)$$

当 $A < 1$ 时出现湿润条件,此时区域水分有盈余;当 $A > 1$ 时属于干旱条件,此时气候划分是缺水。华北平原一般 $A > 1$,尤其黄河以北 A 值多为1.4~1.5。将(4)式代入(3)式得:

$$WP = P(1 - A) + R \quad (5)$$

华北平原的水资源量潜力变化较大,黄河以南为正值,黄河以北为负值,因此许多地方大量开采地下水以满足用水需求。用水需求受供水潜力的制约,这种制约首先是地区的水资源承载力。当需水量(WR)一定时,用水资源量潜力与需水量平衡即可计算出水资源的承载力是否能满足需求。在一般情况下(现状用水技术)测定小麦高产需水量为460mm左右(栾城站与南皮站),玉米为350mm左右,二者合计为800mm,而按式(5)计算仅为600~650mm,承载力仅满足75%~81%,但如改熟制为2年3熟(小麦-玉米-小麦),则承载力可满足作物的需求。

3 农田水分利用效率指征

3.1 灌溉水利用率、灌溉效率及有效降水量

灌溉水利用率指征主要有渠道水利用系数、渠系水利用系数、田间水利用系数和灌区灌溉水利用率。渠道水利用系数(η_c)标志干、支、斗、农各级渠系中任一渠道或区段的水利用率;渠系水利用系数(η_r)包括干、支、斗、农渠系的水利用率,用下式计算:

$$\eta_r = \eta_{c+} \cdot \eta_{c+} \cdot \eta_{c+} \cdot \eta_{c+} \quad (6)$$

田间水利用系数(η_f)标志田间工程的方式与水平;灌区灌溉水利用率(η_i)标志整个灌溉水利用率,显然:

$$\eta_i = \eta_r \cdot \eta_f \quad (7)$$

灌溉效率为全年时期或灌溉季节时期每秒立方米水的灌溉土地面积($\text{hm}^2/\text{s} \cdot \text{m}^3$)和灌水生产率($\text{hm}^2/\text{d} \cdot \text{t}$)。

有效降水量(P_e)标志降水在土壤层中能被作物利用的那部分降水量:

$$P_e = P - R_s - E_r - W_f \quad (8)$$

式中, R_s 为地表径流量, E_r 为雨期蒸发量, W_f 为深层渗漏量。对非灌溉农田作物(旱作农业)而言, P_e 的确定对雨养农田十分重要,它是制定农田灌溉制度的重要依据。

3.2 作物水分利用效率

作物水分利用效率指征包括叶片水平上的水分利用效率(即光合与蒸腾之比)、群体水平上的水分利用效率和产量水平上的水分利用效率。

叶片水平上的水分利用效率(WUE_L)即单位水量通过叶片蒸腾散失时光合作用所形

成的有机物质,它取决于光合速率与蒸腾速率的比值,是植物消耗水分形成干物质的基本效率,即水分利用效率的理论值。叶片水平上的水分利用效率表示为:

$$WUE_l = \frac{P_n}{T_l} \quad (9)$$

式中, P_n 为叶片净光合速率, T_l 为叶片蒸腾速率。水汽和 CO_2 通量均可以浓度梯度和扩散阻力描述^[4]。单位叶面积叶片净光合速率表示为:

$$P_n = \frac{\Delta C}{r_b + r_s + r_m} = \frac{C_a - \Gamma}{r_b + r_s + r_m} \quad (10)$$

式中, C_a 为空气 CO_2 浓度, Γ 为 CO_2 补偿点(细胞质体中 CO_2 浓度), ΔC 为空气 CO_2 浓度与 CO_2 补偿点之差, r_b 、 r_s 分别为 CO_2 扩散入叶片的边界层阻抗和气孔阻抗, r_m 为 CO_2 扩散入细胞叶绿体中叶肉阻抗。单位叶面积蒸腾速率表示为:

$$T = \frac{\Delta H_2O}{r_b + r_s} = \frac{\frac{\rho \varepsilon}{P}(e_b - e_a)}{r_b + r_s} \quad (11)$$

式中, ΔH_2O 为细胞间隙中水汽浓度与大气中水汽浓度之差, ρ 、 P 分别为空气密度和大气压, ε 为水汽和空气的摩尔质量之比, $e_b - e_a$ 为叶、气水汽压梯度差, r_b 、 r_s 分别为水汽扩散的边界层和氣孔阻抗。群体水平上的水分利用效率(WUE_c)即作物群体 CO_2 净同化量与蒸腾量之比,也是群体 CO_2 通量和作物蒸腾的水汽通量之比。相对单叶水平水分利用效率,它更接近实际情况,可用来表征田间或区域的水分利用效率,其指标可用作物群体 CO_2 通量(F_c)与作物蒸腾的水汽通量(T)比值表示:

$$WUE_c = \frac{F_c}{T} \quad (12)$$

采用波文比-能量平衡法^[1]测定农田群体 CO_2 和水汽通量(蒸散),水汽通量(ET)计算式为:

$$ET = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)\lambda} \quad (13)$$

式中, R_n 为入射净辐射, G 为土壤热通量, λ 为汽化潜热, β 为波文比。群体 CO_2 通量(F_c)计算式为:

$$F_c = \frac{R_n - G}{C_p(\gamma + 1)} \frac{\partial C}{\partial T_e} \quad (14)$$

式中, γ 为水汽平均密度与干空气平均密度之比, C_p 为定压比热, C 为 CO_2 质量混合比浓度, T_e 为有效温度。农田蒸散(ET)分为作物蒸腾(T)和棵间蒸发(E),作物蒸腾占农田蒸散的比例 α 因不同作物或作物不同生育期而异,由栾城站田间试验得出冬小麦叶面积指数(LAI)分别为 <3 、 $3 \sim 4.5$ 、 >4.5 时,对应的 α 分别取 0.44、0.67 和 0.85。 α 影响群体水分利用效率,可作为指标估算不同作物或作物不同生育期水分利用效率的潜力。

产量水平上的水分利用效率(WUE_y)即单位耗水量的产量。产量可表示为净生产量或经济产量,其中经济产量更接近农业生产实际;耗水量考虑到土壤表面的无效蒸发,对节水更有实际意义。目前研究最多的是该层次水分利用效率,这是农田、作物节水研究的重要内容。产量水平上的水分利用效率指征(WUE_y)计算式为:

$$WUE_j = \frac{Y}{WU} \quad (15)$$

式中, Y 为作物产量, 可表示为总生物量(Y_b)或经济产量(Y_e), WU 为作物用水量。作物水分利用效率的指征一是用作物耗水量, 即蒸散量(ET , 亦称蒸散效率), 这是普遍所指的水分利用效率; 二是用灌溉水量(I), 得到的是灌溉水利用率, 它是确定最佳灌溉定额必不可少的指征; 三是用天然降水(P)及其利用率, 它是旱地农业水分利用的重要指征。

4 调控指征

潜水调控指征。潜水调控指浅层地下水补给与排泄的控制。在华北平原主要是旱、涝、碱(土壤盐分)的调控。重要指征是潜水位, 有从降水中接受最大补给的潜水位(H_m); 潜水补给为零的深度(H_0); 使潜水蒸发为零的潜水位深度(H_d); 潜水层的降水补给量与上升蒸发量相等的平衡埋深(H_{eq}); 潜水层降水净补给(减去上升蒸发量)最大值的埋深(H_g); 土壤盐分上升不能在地面积聚的潜水位临界埋深(H_c); 作物产量最佳的潜水位埋深(H_p)。以上7种潜水位埋深的深度关系为: $H_0 > H_d > H_g > H_m > H_p > H_c > H_{eq}$ 。

节水调控指征。控制深层渗漏, 采用计划层蓄水容量(Q_0)与蓄集降水量(P_r)的比值; 提高渠系输水效率, 采用各 η 值; 提高田间水利用率, 可采用土地平整程度与灌畦尺寸大小作为指征; 发展水资源联合调度与利用, 采用河(地表水)灌区中井水(地下水)适宜比重指征; 提高农业供水管理水平, 包括多种指征, 如供水成本与水费的比值、单位供水的产出, 效益成本比等。

5 结 语

可持续农业水资源的管理评价包括范围很广, 本文仅列举了若干相关的指征, 但不能以此指征来概括所有的评价, 今后的研究从可持续农业的水资源利用出发, 通过归纳与演绎以期制定一个完整的指征体系。

参 考 文 献

- 1 李 俊, 于沪宁, 刘苏峡. 冬小麦水分利用效率及其环境影响因素分析. 地理学报, 1997, 52(6): 552~560
- 2 黄秉维等主编. 现代自然地理. 北京: 科学出版社, 1999. 70~93
- 3 左大觉, 段志煌, Miklos Faust 主编. 中外著名专家论中国农业. 北京: 中国农业大学出版社, 1998. 294~299
- 4 Bierhuizen J. F., Slatyer R. O. Effects of atmospheric concentration of water vapor and CO_2 in determining transpiration photosynthesis relationships of cotton leaves. Agricultural Meteorology, 1965, 2: 259~270
- 5 Farquhar G. D., Sharkey T. D. Stomatal conductance and photosynthesis. Ann. Rev. Plant Physiol., 1982, 33: 317
- 6 Shalhevet J., Liu Changming, Xu Yuexian. Water use Efficiency in Agriculture. Rehovot, Israel: Priel Publishers, 1992
- 7 Stanhill G. Irrigation in Israel: past achievements, present challenge and future possibilities. Ibid, 1992