太行山前平原农田高效用水模式研究*

张喜英 裴 冬 由懋正
(中国科学院石家庄农业现代化研究所 石家庄 050021)

摘 要 实现地下水采补平衡是维持太行山前平原区农业持续发展的重要基础。根据多年的田间试验结果研究探讨了减少农田非生产性耗水、水肥耦合提高水分利用效率、节水高效灌溉制度、根系调控与提高土壤水利用率实现地下水采补平衡的途径和措施。实施大面积秸秆覆盖可减少农田耗水量约40mm;优化灌溉制度可减少冬小麦生育期1次灌水60mm。

关键词 太行山前平原 农田 高效用水

Ways for increasing water use efficiency in farmland of Taihang piedmont. Zhang Xiying, Pei Dong, You Maozheng (Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization, CAS, Shijiazhuang 050021), *EAR*, 1999, 7(3): 22~26

Abstract For sustainable agricultural development in Taihang piedmont, measures must be applied to reduce irrigation water use. Based on field experimental results for many years, ways for increasing farmland water use efficiency are discussed and the measures include reducing soil evaporation, coupling water and fertilizer, fully utilization of soil water, high efficient irrigation schedule and managing root system for efficient water use. Straw mulching can reduce farmland evaporation about 40mm annually, and one or two irrigations can be omitted by optimal irrigation schedule to winter wheat.

Key words Taihang piedmont, Farmland, Efficient water use

我国北方水资源不足已成为农业持续发展的首要限制因素,因干旱缺水每年粮食减产700~800亿kg,600多座城市中有1/2缺水,农村和牧区4600万人饮水困难。我国耕地面积仅占世界总耕地面积的7%,其中灌溉面积占21%,人均灌溉面积与世界平均水平相当,粮食生产安全与水资源利用密切相关。美国科学家布朗博士指出危机中国粮食自给能力的水资源短缺"可能拉动世界粮价上涨,从而引发第三世界国家的社会和政治动荡"。为了保障下世纪我国16亿人口的粮食生产安全,必须发展节水农业,改变传统的灌溉方式,变灌溉土地为灌溉作物,根据作物需水规律制定高效节水灌溉制度,通过实施工程、管理和农艺措施大幅度提高水分利用效率。

太行山前平原土壤深厚,有机质含量高,地下水较丰富,水质好,灌溉发展早,农业生产水平较高,目前粮食平均产量已达15t/hm^2,但这种高产是靠过量开采地下水来维持的。该区年均降水量450~500mm,主要作物冬小麦和夏玉米总需水量>800mm,冬小麦

* ACIAR资助中澳合作研究项目(LWR1/95/07)和"九五"国家科技攻关项目(96-006-02-03-3)部分研究内容
收稿日期:1999-04-18

生长期间一般需灌 3～4 水，夏玉米需灌 1～2 水，年灌溉需水量 300～350mm。而地下水的侧向补给量和降水补给量远小于需水量，导致该区大量开采地下水，浅层地下水位大幅度下降，地下水埋深从 70 年代的 10m 左右降至现在的 20～30m，近年连续干旱使地下水位下降速度＞1.5m/a，如此发展则使有些地区浅层地下水将面临枯竭，高产农业难以为继。一方面水资源短缺，另一方面又严重浪费水资源。山前平原井灌区水的有效利用率为 60%；水的生产效率约 1kg/m^3，远低于世界发达国家 2kg/m^3 以上的水平。因此，该区节水农业发展潜力巨大。

从水源引水、降水利用到作物耗水形成产量要经过一系列物理和生物过程，节水农业充分有效地利用自然降水和灌溉水资源，通过实施水利、农业、管理等措施，最大限度减少输水、配水、灌水直至作物耗水过程中的水资源损失，最大限度地提高单位耗水量的作物产量和产值，而提高农田水分利用效率是节水农业的重要方面和节水农业发展的潜力所在，本文探讨了提高太行山前平原高产区农田水分利用效率的途径和措施。

1　提高根系吸水能力，减少农田水分蒸发

一般上层土壤作物根量占总根量的绝大部分，根系的这种分布有利于作物尽快吸收土壤上层水分，与蒸发失水竞争。有些条播作物和穴播作物行上和行间根长密度差异很大，如玉米行间表层土壤基本无根系存在，小麦行间和行上根长密度差异很显著，行间表层土壤水损失基本是蒸发耗水，通过耕作、施肥、灌水、疏松土壤等可显著增加行间根系生长。田间作物播种时分布均匀也可使表层根长密度分布合理，促进根系多利用表层土壤水分，减少蒸发失水。

作物生长期间可利用水分包括播种时土壤剖面贮存水、生长期降水和灌水，部分降水或灌水通过地表径流和根层渗漏而损失。此外，棵间蒸发量在作物生育期耗水中约有 1/3 为无效棵间蒸发失水，因此减少棵间蒸发失水是提高土壤水分利用效率的重要途径之一。棵间蒸发失水速率除受大气条件影响外，主要受表层土壤含水量和叶面积指数的影响，棵间蒸发占农田蒸散之比随表层土壤含水量的降低和叶面积指数的增大而减少，特别是当叶面积指数小、灌水或降水后土壤表层很湿，农田土壤水分散失主要是棵间蒸发耗水，因此提高根系对这部分土壤水分的吸收速率可减少棵间蒸发损失。

减少土壤蒸发失水的方法很多，如中耕锄划、留茬播种、秸秆覆盖、沙覆盖、喷洒化学药剂等，其中作物秸秆覆盖是减少土壤蒸发、增加降水入渗、改良土壤的有效途径之一。中国科学院栾城农业生态系统试验站（以下简称栾城站）用 2 台水力蒸发器同步观测秸秆覆盖和不覆盖夏玉米蒸散速率变化表明，秸秆覆盖显著减少玉米耗水量，总耗水量减少 12.9%～13.5%，农田水分利用效率显著提高。栾城站 5 年夏玉米秸秆覆盖对农田水分利用效率影响试验结果表明，秸秆覆盖使农田水分利用效率平均增加 6.0%～10.9%，如按夏玉米耗水量 400mm 计算，水分利用效率提高 10%，相当于减少 40mm 用水量。秸秆覆盖对宽行作物或经济作物效果更明显。太行山前平原秸秆资源十分丰富，但浪费严重，大面积焚烧秸秆造成环境污染，因此充分利用秸秆覆盖保墒，提高农田水分利用效率是华北平原节水农业措施的重要组成部分。

土壤水蒸发可分为 3 个阶段：稳高阶段，出现在田间持水量到毛管断裂水量之间，蒸发速率完全受气象条件影响；速降阶段，土壤含水量维持在毛管断裂水量至萎蔫系数之

间，控制这一阶段失水快慢的主要因素是土壤水分向蒸发面移动速率，主要取决于土壤水分传导速率；稳低阶段，这一阶段土壤蒸发面含水量已降至萎蔫系数以下，土壤水的液态流动基本停止，蒸发速率很低。缩短稳高阶段和速降阶段，使土壤表面的蒸发速率减小，可显著降低蒸发耗水强度，使作物根系更多吸收土壤上层水分。蒸发稳高阶段通过松土割断表层土壤与下层土壤的毛管联系，阻止毛管水上升至土壤表面，可减少蒸发；速降阶段通过耱地或镇压使表土细碎，以减少大孔隙向外散失土壤水分，耱地后土壤表层形成较薄的疏松层，且很快干燥后覆盖在湿润土层上而起到保墒作用。栾城站冬小麦返青期进行顶凌耙耱，0～10cm 土壤含水量明显高于对照，土壤湿度约增加 14%，2 月下旬至 4 月初总蒸散量减少 20mm。夏玉米苗期中耕可显著割断毛管水上升，减少土壤失水速率，0～30cm 土壤重量含水量比不中耕处理高 8%以上，同时中耕能够改善土壤通气状况，增加降水入渗，消灭杂草，最终减少水分和养分的非生产性消耗。

2 提高单位耗水生产效率

选用节水品种，提高作物收获指数。不同作物蒸腾效率各异，同一作物不同品种之间水分利用效率也不同，选择高产、优质、高水分利用效率的品种是农艺节水技术的重要组成部分。栾城站 2 年冬小麦品种试验结果表明，不同小麦品种产量相差 10%～15%，水分利用效率相差 10%～20%，"4185"品种产量和水分利用效率较高。收获谷物的粮食作物其地上部分经济产量占生物产量的比例(收获指数)影响其经济产量，一般随收获指数的提高，产量和水分利用效率也高。收获指数的大小与作物生育期间水分供给密切相关，通过合理供水，使整个生育期间作物水分消耗的分配趋于合理，控制作物早期根系过多地吸收利用土壤储水，保留部分土壤水分用于作物生殖生长更有利于经济产量的形成。供水时间、供水量及供水频度等均影响灌溉作物地上部分干物质的形成和光合产物向经济产量的转化，制定高效、经济的供水制度，是提高收获指数及农田水分利用效率的重要措施。

改善土壤肥力，提高水分利用效率。土壤肥力通过影响作物生长发育和产量而影响作物水分利用效率，同时土壤水分的运动和有效性也影响土壤养分对作物的有效性。土壤养分一般集中于耕层土壤中，影响根系分布如根量、根密度和根深等，供肥充足的作物根系深、根量大，提高了土壤水分和养分对作物的有效性。肥力供应合理充足的作物产量及水分利用效率较高，但并不是产量最高时水分利用效率最高；土壤肥力低时，随施肥量的增加而作物产量提高，水分利用效率也随之增加。中国科学院水土保持研究所的试验结果表明，单产 1500～2250kg/hm^2 的农田每 mm 降水小麦生产效率为 0.4kg；单产 3000kg/hm^{2}的农田每 mm 降水小麦生产效率为 0.55～0.60kg；单产 3750～4500kg/hm^2 的农田每 mm 降水小麦生产效率为 0.65～0.80kg；单产 6000kg/hm^2 的农田每 mm 降水小麦生产效率可达 0.9kg。因此作物水分利用效率随生产水平的提高而增加。

3 建立高效节水灌溉制度

作物不同生育期对水分亏缺敏感程度不同，灌水时间对作物产量、水分利用效率和收获指数等有显著影响，如冬小麦在返青～起身期和灌浆后期控制水分供应，其产量反而比无水分亏缺处理增加 8.5%和 1.1%，拔节、孕穗和开花灌浆前期控制水分供应，产量分别降低 4.7%、4.1%和 1.9%。根据水与作物生长发育及产量形成间的关系，通过有限水量

在作物生育期的最优分配，提高有限灌水量向作物根系吸水转化效率和光合产物向经济产量转化效率，进而达到高产和高水分利用效率的目的。

许多研究表明，水分亏缺并不总是降低产量，适度水分亏缺反而提高作物产量和水分利用效率，这是因为作物对适度水分亏缺产生了补偿或超补偿效应，这种补偿效应常表现在作物受旱后复水，其若干生理功能超过一直充足供水的生理功能，作物受旱期间其生长虽受一定抑制，但可能强化了能量代谢和一些生物合成，增加了光合产物向经济产量的转化，提高了经济系数。相同灌水量、不同灌水时间冬小麦产量和农田水分利用效率不同，如表 1 均灌 2 水冬小麦由于灌水时间的差异，最高和最低产量相差 15.3%，水分利用效率相差 16.73%。因此，根据不同作物不同时期对水分亏缺的反应，制定高效的供水制度，可显著提高农田水分利用效率。

表 1　灌水时间对冬小麦产量及水分利用效率的影响

Tab. 1 Effects of irrigation schedule on the yield and water use efficiency of winter wheat

灌水时间(月-日) Irrigation date MM-DD	灌水时期 Irrigation stage	总灌水量/mm Irrigation norm	总耗水量/mm Total water use	产量/kg·hm^{-2} Yield	水分利用效率/kg·hm^{-2}·mm^{-1} Water use efficiency
03-27,04-22	起身、拔节	171.4	428.9	6494.3	15.14
03-27,04-29	起身、拔节后期	200.1	475.9	6308.6	13.26
03-27,05-07	起身、抽穗	186.7	460.0	6503.3	14.14
03-27,05-14	起身、开花	193.7	476.1	6219.8	13.06
04-18,05-14	拔节、开花	194.8	470.1	7170.0	15.25
04-29,05-22	拔节、灌浆	176.7	413.2	6236.6	15.09

4　根系调控与提高土壤水分利用效率

太行山前平原土层深厚，蓄水能力强，200cm 土层的田间总蓄水量＞700mm，凋萎湿度至田间持水量间有效水量约 450mm，相当于多年平均降水量的 90%以上，因此采取合理的种植制度和耕作措施，蓄住自然降水，保护底墒，使作物充分利用土壤蓄水，对缓和季节性干旱与减少灌水量将起到重要作用。太行山前平原农田不同深度土壤水分动态变化（见图 1）表明，上层土壤水分随降水、灌溉及蒸散失水的影响波动极大，但 100cm 以下土

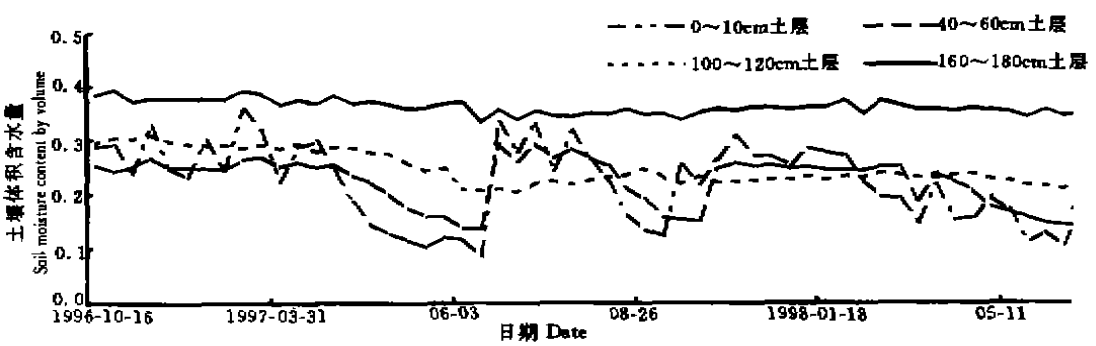

图 1　太行山前平原农田土壤水分动态(栾城站)

Fig. 1　Farmland soil water dynamics at Luancheng Station

壤含水量变化幅度很小，140cm 以下土层土壤含水量常年维持高水平，表明作物对深层土壤储水的利用率很小，这与深层土壤作物根系少有关。该站多年观测结果表明，太行山前平原冬小麦和夏玉米根系分布特征为冬小麦平均根深约 200cm，夏玉米约 100～120cm，冬小麦和夏玉米上下茬搭配根系分布较合理，玉米生长期间为雨季，较多降水可变为深层

土壤储水，为下茬冬小麦利用，减少灌水量，提高土壤水分利用效率。一般当土壤含水量达一定水平时，蒸腾速率不受土壤含水量的影响，只有当土壤湿度下降到某一界限值时，随着土壤含水量的降低蒸腾速率下降，这与土壤非饱和导水率有关，一般在－100～－1000kPa之间。这表明当土壤含水量在一定界限值以上时，根系吸水不受土壤含水量的影响，而只受由大气条件决定的蒸腾速率的影响。在含水量较高的土壤剖面上，根系吸水从土壤表层开始并逐渐向土壤下层移动，当土壤表层含水量由于灌水和降水再次升高时，根系主要吸水层又从表层开始向下推移，这种根系吸水模式与根系分布紧密相关，因为土壤表层根系占总根系的绝大部分，因此根系吸水的主要层次发生在根系最多的部位。根系吸水除了受根量、土壤含水量和导水性能的影响外，根系本身的活性也影响根系对土壤水分的吸收和利用，一般随着根系老化其吸水活力降低。限制冬小麦充分利用深层土壤储水的直接原因是深层土壤根长密度小，当根长密度<0.8cm/cm³时，根系不足是限制根系充分利用土壤水分的原因。

影响根系生长的主要土壤环境条件有土壤机械力度、容重、紧实层、土壤孔隙度、pH值等，深耕打破犁底层可显著促进深层根系生长，促进根系对深层土壤水分的利用，减少灌水量。上下茬作物的搭配也影响下茬作物根系生长，例如上茬作物根系形成的通路可在土壤中维持很长时间，使下茬作物根系更易于生长其中。农田供水状况对根系在土壤中的分布有极大影响，干旱条件下根系相对生长增加，特别是深层根比例明显增加；经常小量灌水的根系生长较浅，早灌和深灌可促进根系深扎而增强作物的抗旱性。不同品种间根系生长发育各异，抗旱和耐旱品种的根冠比较大，深层土壤中根量较多，提高了深层土壤储水的利用率。为提高根系对土壤水分的利用能力，应控制根系形态，增加土壤水分供给量；加强根系管理，使生长季节的有效水分供给趋向合理；调节上层土壤根系分布，变土壤棵间蒸发耗水为作物蒸腾耗水。

总之，提高农田水分利用效率的途径和方法是多方面的，节水潜力很大。通过上述措施可将太行山前平原作物水分利用效率从目前的1kg/m³提高到1.5kg/m³，在不增加用水量的条件下实现大幅度增产和需水量的零增长，维持地下水采补平衡，促进农业可持续发展，以保障下世纪粮食生产安全。

参 考 文 献

1 刘昌明，张喜英，由懋正. 大型蒸渗仪结合微型蒸发器测定冬小麦蒸散量. 水利学报，1998 (10)：36～39

2 刘昌明等主编. 土壤植物大气系统水分运动实验研究. 北京：气象出版社，1997. 107～166

3 陈敏建. 我国二十一世纪的水和粮食安全问题. 水利学报，1999 (1)：1～6

4 李英能. 我国节水农业发展模式研究. 节水灌溉，1998 (2)：7～12

5 Passioura JB. Grain yield, harvest index and water use of wheat. J. Aust. Agric. Sci., 1997, 43: 117～120

6 Taylor HM. Managing root systems for efficient water use: an overview. In: Limitations to efficient water use in crop production. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1983. 50～56

7 Tanner CB, Sinclair TR. Efficient water use in crop production: research or re-research. In: Limitations to efficient water use in crop production. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1983. 158～230

8 Turner NC. Plant water relations and irrigation management. Agric. Water Mana., 1990, 17: 59～73

9 Unger PW, Stewart BA. Soil management for efficient water use: an overview. In: Limitations to efficient water use in crop production. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1983. 286～299