



水土资源约束下保障 粮食安全的战略思考*

文 / 王浩 杨贵羽 杨朝晖

中国水利水电科学院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室 北京 100038

【摘要】 粮食安全是世界性问题,我国作为农业大国,由于人口基数庞大,对粮食刚性需求量较大的现实,粮食安全更是世界关注的焦点。面对我国农业生产和粮食安全存在的问题,文章通过对影响我国粮食生产的两大刚性约束——土地资源和水资源,系统阐述了我国保障农业生产和粮食安全所面临的挑战;为从根本上缓解农业水土资源不足,从耕地和农业水资源两方面提出了相应的调控措施。即在耕地资源方面,要在适度发展耕地后备资源的基础上,加强现有耕地数量和生产能力保护;在农业水资源方面,应结合农业水循环的特点,从“开源”上重视径流和非径流性水资源,在“节流”上加强农业耗水管理的根本策略;最后围绕农业水资源动态转化的中心环节——土壤水资源的循环特性,结合土壤水资源的消耗效率,进一步系统阐述了土壤水资源的调控方向。

【关键词】 粮食安全,农业发展,水资源,土壤水资源,农业水循环,调控策略

DOI 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.03.006

1 前言

粮食安全关系人类生存和经济社会发展,始终是全球共同关注的重大问题。我国是一个农业大国也是个农业古国,在众多人口对粮食需求的刚性驱动下,农业在国民经济发展中始终占有极为重要的地位。尽管

在国家宏观政策的调控下,我国创造了以世界6%的可更新水资源和9%的耕地养活了世界22%的人口奇迹,实现了21世纪以来粮食生产九连增的辉煌成绩。然而,从长远来看,随着经济的发展,工业化、城镇化进程的快速推进,耕地与水资源农转非现象严重,农业水土资源成为制约我国粮食生产的

* 修改稿收到日期:2013年4月27日

资助基金:国家重点基础研究发展计划(2010CB951100)、国家自然科学基金重点项目(50939006)和国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目“流域水循环模拟与调控”(51021066)

通讯作者:杨贵羽,中国水利水电科学研究院高级工程师(E-mail: guiyuy@iwhr.com)

两大刚性约束。面对日益严峻的水土资源状况和世界粮食危机问题,我国的粮食安全问题成为世界各国关注的焦点。美国世界观察研究所所长莱斯特·R·布朗^[1,2]、芝加哥大学著名中国经济问题专家D·盖乐·约翰逊^[3]以及其他研究者先后对我国的粮食安全进行了研究,国内研究者也从不同的角度论述了相关问题。尽管得出的结论差异较大,但是他们所提出的问题值得我们深思。如何立足于我国农业水土资源现状发展农业,保障我国的粮食生产成为中央政府和人们关心的焦点问题之一。

水资源作为经济社会发展不可替代的基础支撑,是现代农业建设不可或缺的首要条件。由于我国水资源本底条件较差,其天然分布又与耕地及农作物生长季节极不匹配,加之经济社会高速发展条件下农转非等现象,水资源匮乏对粮食生产的影响更加凸显。据《全国水资源综合规划》预测,到2030年,即使在强化节水方案条件下,我国农业缺水仍达400亿m³左右;即使要保障2020年全国10亿亩有效灌溉面积也仍需要大量的水资源。由此可见,我国农业受制于水的状况将长期存在。如何立足于我国的水土资源现状保障未来农业基本水资源需求成为我们亟待解决的问题之一。

为此,本文在系统阐述我国农业水土资源状况及其对粮食生产的影响,全面剖析我国农业水土资源面临挑战的基础上,结合农业水循环的特点,从“开源”和“节流”两方面提出了保障我国农业水资源的基本策略,并围绕农业水资源动态转化的中心环节——土壤水资源的循环特性,结合其消耗效率,提出了加强土壤水资源消耗管理的基本调控方向。

2 我国的农业水土资源情势

我国地处北半球,跨越了从北温带到热带3个气候区,在东西方向上又具有东部湿润气候区的滨海平原、中部半湿润半干旱气候的平原丘陵、西北部干旱气候区的丘陵、山地过渡的地形地貌

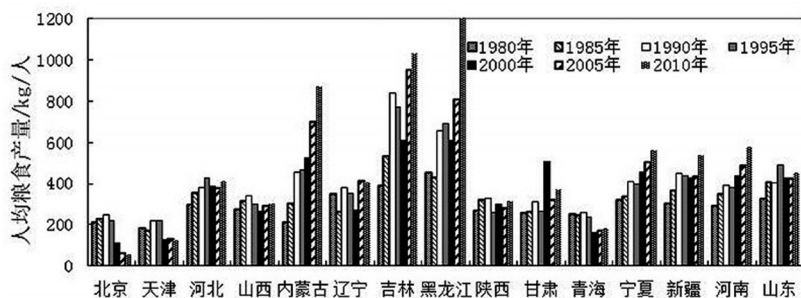
特点。特殊的地理位置、变化的地貌特点使得地区间气候及天然来水在时空分布上极不均匀,水土(耕地)资源的开发利用区域间差异较大。

耕地资源方面:耕地作为农业生产最基本的生产资料和劳动对象,其数量、质量、空间分布格局及其受保护程度直接关系着地区的粮食生产。尽管我国幅员辽阔,农业土地资源绝对数量较大,但是由于人口众多的现实使得人均占有量较少。据统计,我国耕地人均占有量仅为933.3m²,不足世界人均水平的一半^[4],全国666个县人均耕地低于联合国粮农组织(FAO)确定的0.8亩的警戒线。再加上城镇化及工业用地挤占耕地和生态环境保护的需要以及水土流失、次生盐渍化等自然破坏和占优补劣等不合理耕地开发利用形式的普遍存在,使得我国本已十分有限的耕地资源在数量和质量上均呈现总体下降趋势。据国土资源部统计,1996—2010年15年间全国耕地面积从19.50亿亩减至18.26亿亩,已逼近18亿亩耕地红线^[5];因水土流失、贫瘠化、次生盐渍化、酸化等原因导致退化的耕地面积占耕地总面积的40%以上;2001—2007年全国由于占补耕地而影响粮食生产能力达120亿斤以上。

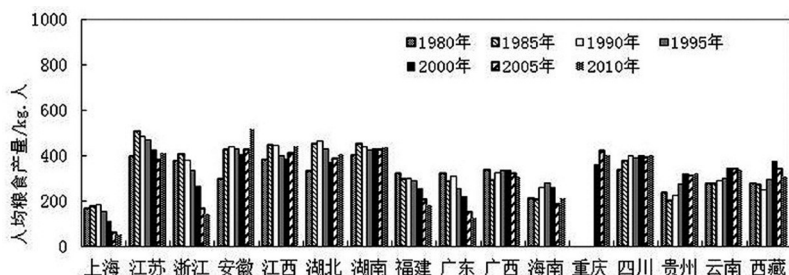
与此同时,在自然和人类活动的共同作用下,我国耕地空间分布格局的变化对粮食生产也造成严重影响。在自然方面,由于全球气候变化,气温普遍升高使得耕地面积北移,一方面扩大了北方耕地面积比重,另一方面增加了农作物适应气候变化的风险^[6];在人类活动方面,由于东部和南部城镇化及工业化进程的推进,使得全国耕地分布比重持续向北扩展,南北方粮食产量发生明显变化。据统计,目前全国13个粮食主产省中7个分布在北方,其粮食生产量占全国的60%,较20世纪90年代初提高了10个百分点,6个南方省的粮食生产仅占全国的15%;即使非粮食主产省的粮食主产县,也绝大部分分布于山西、陕西等北方地区。另外,我国耕地的后备资源较少且也主要分布于东北和西部干旱半干旱地区^[7]。由此可见,有

限耕地资源的时空变化严重影响着我国粮食的生产,不仅导致区域间粮食的供求失衡,而且也进一步加剧了农业水资源短缺的态势。图1给出了我国31个省1985年以来人均粮食产量变化。

于汛期的6—9月份,且81%分布在长江流域及其以南地区;又由于南北方耕地资源分布的差异,使得每公顷耕地上的水资源占有量南北差异极大,长江以南地区为28695m³,而长江以北地区仅为9465m³[8];而且



(a)北方地区人均粮食产量



(b)南方地区人均粮食产量

图1 我国31个省人均粮食产量变化

水资源方面:水资源作为基础性自然资源和战略性经济资源,是保障我国粮食安全的另一刚性约束因素。尽管我国水资源总量相对丰富,位居世界第4位,但是由于人口基数较大,我国人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4,是全球13个贫水国之一。更为严重的是我国水资源的时空分布不均,且与耕地在空间分布上差异较大,使得我国农业水土资源的匹配关系严重失衡,亩均水资源占有量只有世界平均水平的50%。据统计,1956—2010年全国年均降水总量为6.09万亿m³,平均径流量仅为2.65万亿m³,约有70%集中

随着我国粮食主产区持续向缺水和生态脆弱的北方地区转移,单位耕地面积上水资源的占有量还将进一步减少。加之近年来全球气候变化,南北方水资源分布的不均性加剧(据1956—2005年间前后25年南北方水资源占有量比较,南方增加了3%,北方仅为16%^[9]),干旱缺水等极端气候事件频发,进一步加剧了农业水资源的紧张态势。

与此同时,随着工业化、城镇化进程的推进,工农业用水竞争激烈,用于农业灌溉的水量锐减(图2),这进一步影响着我国的粮食生产。据统计,我国粮食产量的2/3来

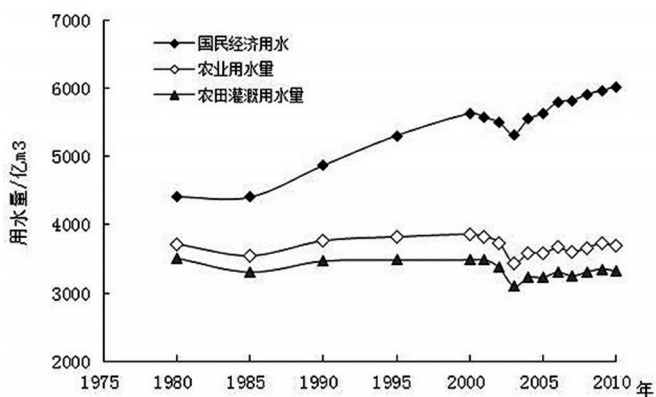


图2 不同产业用水量演变趋势



中国科学院

自于占总耕地面积1/2的灌溉面积上,其他农产品也相当多的产自灌溉耕地^[10]。然而,在1980—2010年的30年间,用于农田灌溉的水资源量持续减少,由3 509亿 m^3 下降到3 294亿 m^3 (图3),减少了215亿 m^3 ,2000年以来全国农业灌溉用水缺口维持在300亿—400亿 m^3 ,实际灌溉面积只有6.5亿亩左右,因缺水减少的粮食产量达350亿—400亿 kg ^[11]。

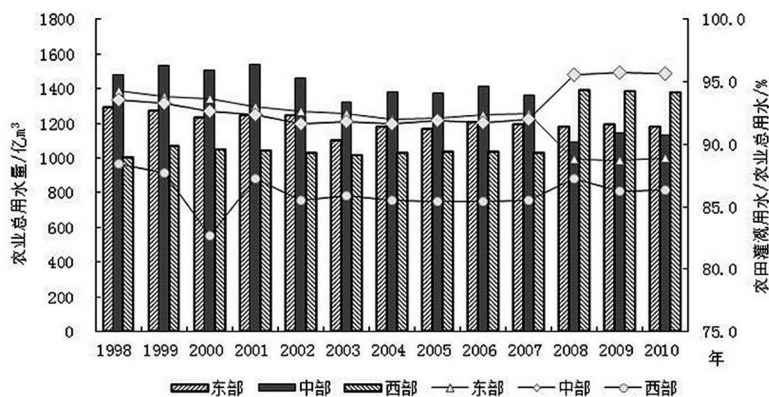


图3 不同区域农业用水量及灌溉用水所占比例

另外,我国农业用水利用效率整体较低,尽管我国从20世纪80年代开始发展节水农业,灌溉水利用系数从2000年的0.42提高到2010年的0.49,但是我国的农业用水效率远不及以色列、南非、埃及等先进国家。据统计,2010年全国有效灌溉面积上的节灌率仅为41%;单方水粮食产量不足 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$,仅为世界先进水平的一半^[12]。

在农业用水过程中,对长期以来在农业生产中发挥重要作用的土壤水资源重视不够,也进一步加剧了农业水资源的短缺。因为土壤水资源作为农作物生长最直接的水分源泉,不仅使用方便,更为重要的在于其数量极为可观。据统计,全球土壤水储存量为 $16.5 \times 10^{12} \text{m}^3$,为河川径流量的7.8倍^[13];整个华北地区降水量的55%以上转化为土壤水资源^[14],黄河流域的土壤水资源量达到2 078.9亿 m^3 ,且尤以干旱半干旱缺水地区降水转化为土壤水资源的比例较大^[15];大量的实验研究也表明:黄淮海区域的大部分地区其冬小麦全生育期需水

量的50%—70%,夏玉米全生育期需水量的80%以上均可由土壤水提供^[16]。此外,在我国,旱作农田占全部耕地的一半,土壤水资源是其唯一的水分源泉。

由此可见,在农业生产中,加强一切可利用水资源的合理开发,提高农业水循环过程中每一滴水的有效利用将对有效缓解农业水资源本底较差的现实具有重要意义;同时,加强土壤水资源的合

理利用,亦是保障雨养农业的重要水源。

总之,由以上分析可见,人增地减、水资源短缺的现实情势严重制约着我国的粮食生产和农业发展,且随着工业化、城镇化的进一步推进,耕地资源和水资源对粮食生产的刚性约束将愈加凸显。面对如此严峻的现实,要从根本上保障粮食安全,发展农业,必须加强基本农业水土资源的保障。即在耕地方面,

应立足于我国耕地资源的现状,适当加大耕地后备资源的开发,加强保障现有耕地资源数量 and 生产能力保护;在水资源方面,应在保障农业基本供水的同时,立足于农业水循环过程全面提高水资源的利用效率。唯其如此,才能从根本上提高粮食生产的保障能力。

3 农业水循环过程解析

农业水循环系统是一个在人类活动作用下,从取(输)水—用(耗)水—排水以及与此相联系的包括粮食生产和农业产业结构调整的人工干预过程;就水的足迹而言,其实质是伴随自然水循环过程的农业人工侧支循环,是社会水循环的重要组成部分。其构成不仅体现为“实体水”的循环,而且也包含着伴随农产品流通的“虚拟水”的循环。

对于“实体水”的循环,集中地表现为通过农业种植业代替自然植被以间接方式影响并参与自然水循环的过程,和伴随“供(取)—用(耗)—排”

水等环节以直接方式影响并参与自然水循环的过程。随着农业种植结构的调整,各种灌溉制度和灌溉节水措施的实施,农业“实体水”的循环过程变得愈加复杂。

对于“虚拟水”的循环,随着区域经济的快速发展,粮食等农产品的流通增强,附着在农产品上的水循环链条进一步延长,即“虚拟水”循环过程在农业水循环系统中变得愈加重要。

在二者的相互作用下,农业水循环系统的复杂性进一步增加。图4给出了农业水循环结构的示意图。

由图4可见,在整个农业用水过程中,农业水资源转化的通量表现为以下两方面:在供给方面,主要体现为常规水资源和非常规水资源以及土壤水资源的供给,而且一切形式的水只有转化为土壤水才能被农作物吸收利用,土壤水的存在转化形式直接关系到径流性水资源的补给和消耗;在消耗方面,集中体现为蒸发蒸腾和深层渗漏。蒸发蒸腾发生在农业水循环的各阶段,包括取(输)水、排水过程的渠系土壤蒸发和水面蒸发,以及农田用水过程的土壤蒸发和作物植

被蒸腾,且在其消耗中占有极大的比重。

由此可见,随着现代农业的发展,农业水循环系统整体上呈现出循环边界不断扩大,循环环节不断增加、循环路径不断延长的演化特征,与此相伴的水量及农业水资源转化效率也随之发生改变。因此,要解决农业水资源短缺,立足于农业水循环全过程,加强不同环节农业可利用水资源数量和消耗效率调控是其根本。

4 基于农业水循环过程的农业用水调控策略及调控方向

4.1 基本调控策略和调控方向

鉴于我国农业发展所面临的水土资源形势,在保障有限耕地资源的前提下,立足于农业水循环全过程,加强“开源”和“节流”是解决农业水资源不足的根本途径。

在开源方面,应“基于农业水循环供给环节,以增加农业可利用水资源量”为目标,加强农业可利用水量调控。由于农业可利用水源不仅包括由降水派生的一次性水资源(包括径流性水资源和土壤水资源),而且也包括再生性二次水资源(包括工业生活废

污水经处理后的再生水资源和集蓄的雨水资源)。因此,加强降水资源、再生水资源等水资源的合理利用,可有效缓解农业径流性水资源供给的紧张态势。具体包括以下3方面:

(1)加强径流性水资源的利用:由于我国降水具有总量相对丰富,但时

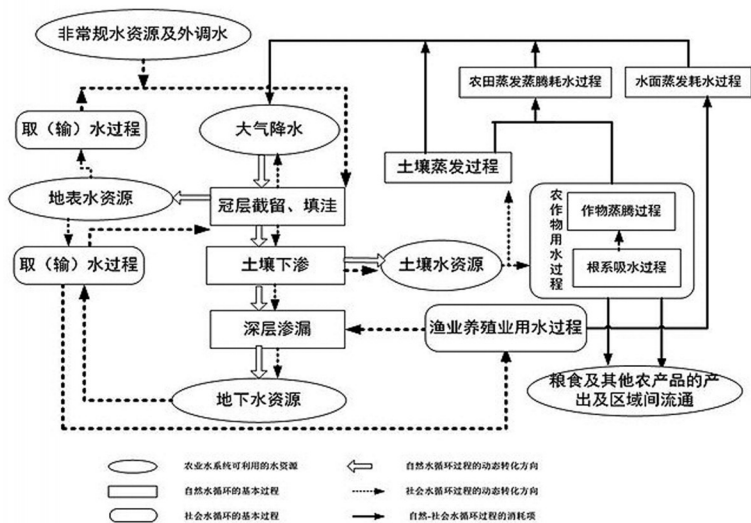


图4 农业水循环系统示意图

空分布不均,且与耕地资源和农作物生长匹配严重失衡的特性,因此要合理利用降水形成的径流性水资源,必须综合区域内和区域间的降水特点,在因地制宜调整种植结构的基础上,应统筹优化水利工程建设,加强农田水利设施建设,通过对降水在时空间上的调配,增加径流性水资源的利用。

(2)加强降水非径流性水资源的转化与利用:降水转化的非径流性水资源集中体现为土壤水资源。由于土壤水分是农作物生长最直接的水源,蓄水保墒,增加土壤水资源的涵养是保障农业生产最直接的举措。为此,一方面要增加土地覆被,减少田间径流的生成,实现土壤水源涵养;另一方面,应加强非充分灌溉制度的实施和雨养农业的发展力度,通过调整土壤非饱和带库容,促进降水入渗蓄存量,从而提高农作物根系活动区土壤水资源的转化,达到涵养土壤水源的目的。

(3)对于其他非常规水资源的利用:通常农业灌溉用水主要集中于地表水和地下水等常规水资源。然而,随着我国人口的不断增长和国民经济的迅速发展,用于农业的常规水资源量已受到限制。结合农业用水对水质要求相对较低的特点,重视工业生活废污水经处理后的再生水资源、地下微咸水等非常规水资源,是解决农业水资源不足的另一重要手段。

在节流方面,应以“基于农业水循环(耗)水环节,提高农业水资源利用效率”为准则。由于水资源需求的本质在于消耗,耗水是水资源的真实需求量,且发生于农业水循环的各个环节。因此,加强农业水循环不同环节的耗水管理,将有助于全面提高农业水资源的利用效率。具体包括以下3方面:

(1)加强总量控制和定额管理,提高灌溉水利用效率:以农业水循环的基本过程为对象,一方面要加强农田灌溉输水过程中水分的调控,以减少非生产性消耗,提高输水效率;另一方面要结合区域的特点和农业水循环过程中水资源的消耗效

率,以减少非生产性无效消耗或生产性低效消耗为指导,按照水资源的供耗关系,合理调配水资源,提高各种水源地利用效率,严格控制农业用水定额和用水总量。

(2)水旱并举,工程措施和非工程措施并重,提高土壤水资源的利用效率:根据国家科技攻关研究,我国北方旱作农区降水量的20%以径流损耗,而休闲期无效水分蒸发占降水的24%,真正能够被农业生产利用的降水只占降水总量的56%;就是这56%的利用量中,又有26%因田间蒸发而散失,作物真正利用的降水只有总量的30%。在南方水资源相对丰富的地区,降水的利用效率更低^[17]。因此,提高降水资源利用效率可有效缓解农业水资源的不足。

(3)挖掘植物抗旱特性,发展生物节水技术,提高农作物水分转化效率,提高生产性高效消耗的比例,可减少水资源的浪费。

4.2 土壤水资源的调控意义和调控方向

土壤水资源作为农业生产最直接的水分源泉,一切形式的水只有转化为土壤水才能被农作物吸收利用,因此,加强土壤水资源的调控管理是实现农业水资源开源与节流的核心环节。然而,由于土壤水资源不能直接提取和运输,一定时段一定区域内仅表现为一个动态转化的过程量,在接受补给的同时也在消耗,且在多年平均尺度上最终被全部消耗(在多年平均时间尺度上,土壤水资源蓄变量趋于零),绝大部分以蒸发蒸腾的形式散失,只有极少部分有被产品带走的特点,因此,加强土壤水资源消耗管理和调控,是提高土壤水资源效率的主要方式。这也是我国执行最严格水资源管理和开展“以耗水(ET)管理”为核心水资源管理的重要组成。

土壤水资源的消耗由植被蒸腾和棵间土壤蒸发构成。由于消耗形式的差异,使得其消耗效用明显不同。对于植被蒸腾,是指通过植物根系吸收到植物体,除少量存储于植物体内,绝大部分通过植物叶面扩散到大气中参与湍流交换过程的土

壤水资源量;其消耗效率由环境因素所决定,主要取决于农作物叶片周围的水汽压、根系影响层土壤含水量。据有关研究分析,在农作物的蒸腾水量中,仅有极少部分参与光合作用(不足1%^[18]),绝大部分以叶片气孔蒸腾的形式散失,被认为是奢侈蒸腾,而奢侈蒸腾部分常被认为是生产性低效消耗。因此,在农业用水过程中,合理调控土壤水分,维持合适的冠层阻力和冠层附近湿度,通过直接或间接的方式调节植被气孔开度,减少低效消耗,提高蒸腾转化效率,可改善农业水循环系统用(耗)水效率。

棵间土壤蒸发,是农业水系统中水资源消耗的又一个主要方面,是在土壤水势与大气水势梯度的作用下,土壤水分由土壤非饱和带液态直接转化为气态,并散失到大气中的自然水循环过程;其消耗量与土壤水分状况密切相关,一方面通过土壤水库提供用于消耗的水量,另一方面通过土壤水分的变化影响植被冠层的能量,进而影响蒸发量。尽管农田棵间土壤蒸发在农田生态系统中发挥着重要的作用,通过调节农田微气候间接影响农作物生长发育,但是就其相对于农业系统的生产而言,棵间土壤蒸发所发挥的作用较小,常被认为是生产性低效消耗。因此,在生产实践中,若能够结合土壤水分蒸发的基本原理,通过采用中耕松土使毛细管断裂,减少棵间土壤水分蒸发的供给量,或结合农作物冠层能量原理,采用地膜覆盖、秸秆覆盖等技术,控制土壤蒸发过程中的温度和水势梯度等方法,控制其合适的棵间土壤水分消耗比例,也是改善农田用水效率的主要方向。

此外,蒸发蒸腾发生在农业水循环的各阶段,不仅包括SPAC系统中的农田蒸发蒸腾,而且也包括发生在取(输)水、排水过程的渠系土壤蒸发和水面蒸发等过程中。对

于农业生产系统中输配水过程的消耗,由于其消耗与农业生产的初衷相悖而被认为是非生产性消耗。因此,在生产实践中,在适当考虑生态环境的同时,应加强渠系等输配水系统的耗水管理,亦可提高农业水资源的利用率。

总之,综合以上分析可见,立足于农业水循环过程,加强一切可利用水资源的利用和不同环节水资源的消耗管理,不仅有利于可利用水资源的开发,而且将有助于从根本上改善水资源的消耗效率。

5 结论

面对我国保障农业生产和粮食安全所面临的挑战,文章从影响我国粮食生产的两大刚性约束——土地资源和水资源进行了系统阐述,从根本上缓解农业水土资源不足,提出了最根本的调控策略;即在耕地资源方面,建议要立足于我国有限耕地资源的现状,适当加大耕地后备资源的开发,加强保障现有耕地资源数量和生产能力保护;在农业水资源方面,建议结合农业水循环的特点,从“开源”上重视径流和非径流性水资源,在“节流”上加强农业耗水管理;并围绕农业水资源动态转化的中心环节——土壤水资源的循环特性,结合土壤水资源的消耗效率,对土壤水资源进行调控。

参考文献

- 1 Lesler Brown R. Who will feed China? Wake up call for a small planet. New York: W.W. Norton & Company, 1995.
- 2 Lesler Brown R, Brian Hailweil. China's water shortage could shake world food security. World Water, July, 2009.
- 3 让·邓肯. 世界粮食市场的变迁与中国粮食. 中国农村经济, 1997(4): 38-42.
- 4 中华人民共和国国务院. 全国土地利用总体规划纲要(2006—2020年). 2008.



中国科学院

- 5 中华人民共和国国务院. 国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要. 2006.
- 6 丁一汇主编. 中国气候变化——科学、影响、适应及对策研究. 北京: 中国环境科学出版社. 2009, 208.
- 7 科学新闻. <http://www.aweb.com.cn>, 2007年12月28日.
- 8 苏人琼. 中国农业可持续发展对水资源的依赖性. 沈振荣, 苏人琼. 中国农业水危机对策研究. 北京: 中国农业科技出版社, 1998, 39.
- 9 中华人民共和国水利部. 水资源公报, 2010.
- 10 中华人民共和国国务院. 中国粮食安全中长期规划纲要 (2008—2020年). 2008.
- 11 贾大林. 农业用水危机与粮食安全对策. 农业技术经济, 1999 (2): 1-5.
- 12 尹成杰. 建设健全农村基层水利管理服务体系走中国特色水利现代化道路. 中国水利, 2011, 6.
- 13 USSR. National committee for the international hydrological decade. In: world water resource balance and water resources of the earth. Printed in the USSR, Leningrad, 1978: 49.
- 14 刘昌明. 水文水资源研究理论与实践——刘昌明文选. 北京: 科学出版社, 2004, 432.
- 15 王浩, 杨贵羽, 贾仰文等. 基于区域ET结构的黄河流域土壤水资源消耗效用研究. 中国科学 D辑: 地球科学, 2007, 37(12): 1643-1652.
- 16 沈振荣, 汪林, 于福亮等. 用好土壤水. 见: 沈振荣, 苏人琼编. 中国农业水危机对策研究. 北京: 中国农业科技出版社, 1998, 235.
- 17 彭致功, 刘钰, 许迪. 灌溉用水管理评价指标体系构建及综合评价. 武汉大学学报(工学版), 2009, 5: 21-25.
- 18 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学. 北京: 中国农业出版社, 1996, 73.

Thinking of Agriculture Development in China Based on Regional Water Resources and Land Cultivation

Wang Hao Yang Guiyu Yang Zhaohui

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract Food security is one of the problems in the whole world. As an agricultural country with large population, China's food security has become a focus issue in the world for a long time. The paper firstly describes the challenge faced in China's agricultural product and food security by analyzing the two rigid constrains of water use and land cultivation. Then, to solve the issues of agricultural water scarcity and land resources shortage, the regulation strategy are put forward according to the utilization situation of the land cultivation and agricultural water resources. For the land cultivation, the amount of the land cultivation and their product capacity should be rationally protected when the reserve land cultivate are appropriately developed. For the agricultural water resources, the basic measures are provided from the view point of development of water resources and water saving based on the agricultural water cycle process. Namely, all kinds of water resources which may be utilized in agriculture, including the no-runoff water resources and runoff water resources, should be rationally used. At the same time, water resources consumption management should be further strengthened based on the water cycle process. Finally, considering the soil water resources is a core linkage in agricultural water cycle and its low utilization efficiency, the regulating direction of the soil water resources are analyzed in detail based on the soil water resources consumption efficiency.

Keywords food security, aagricultural development, water resources, agricultural water cycle, regulation strategy

(转至 321 页)