

# 黑河流域农业用水健康性及其评价方法研究

孙琦伟<sup>1,2</sup>, 吴普特<sup>1,2,3,4\*</sup>, 王玉宝<sup>2,3</sup>, 赵西宁<sup>2,3,4</sup>

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 定性评价了黑河流域农业用水健康性, 并对其定量评价方法进行了初步探讨。在提出农业用水健康性科学内涵的基础上, 分析探讨了农业用水健康性的评价标准、理论与技术基础。以协调性与效率性为标准, 定性判断了黑河流域目前农业用水仍不健康。为进行定量评价, 以资源利用效率、用水结构、用水效率和用水综合效益4个方面为准则, 初步选择了20项指标作为农业用水健康评价的指标体系。

**关键词:** 黑河流域; 农业用水; 健康性评价

**中图分类号:** X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0231-05

黑河是我国第二大内陆河, 发源于青海省祁连山中段, 经甘肃省张掖、酒泉等市县, 最后消散于内蒙古自治区额济纳旗的居延海, 流域面积约14.3万 $\text{km}^2$ <sup>[1]</sup>。其中, 莺落峡以上为上游, 包括青海的祁连县和甘肃的肃南裕固族自治县; 莺落峡以下、正义峡以上为中游, 包括甘肃的山丹县、民乐县、甘州区、临泽县、高台县、肃州区和嘉峪关市; 正义峡以下为下游, 包括甘肃的金塔县和内蒙古的额济纳旗。

黑河流域由于位居欧亚大陆中心部位, 周围高山环绕, 降水稀少而集中且蒸发强烈, 水资源极度匮乏, 流域内主要水源是发源于祁连山的黑河干流及其支流来水。随着人口的增长和国民经济的发展, 灌溉面积不断扩大, 农业和其他部门用水量迅速增加, 水资源供需矛盾日益突出, 生态环境持续恶化<sup>[2,3]</sup>。集中表现在尾间湖泊消失、众多天然河道废弃并形成绿洲内部沙源、天然绿洲萎缩、土地沙漠化发展迅速<sup>[4]</sup>。农业用水是黑河流域用水大户, 约占经济用水总量的95%, 但由于农业用水水平低、管理相对粗放且缺乏科学的评定标准, 使得农业用水问题成为制约黑河流域水资源利用和经济发展的关键因素。因此, 黑河流域农业用水问题越来越受到人们的关注, 这些促使人们开始思考和评价农业用水的合理性, 进而提出了“农业用水健康”的新思路。

## 1 农业用水健康性

### 1.1 农业用水健康性的科学内涵

“健康”一词最早用来形容人体的一种良好状

态。在近几年人们相继将“健康”的概念应用于其它领域并取得了一定的研究成果。在许多领域, 它已经成为一个指导性观念象征。1941年美国著名生态学家、土地学家 Aldo Leopold<sup>[5]</sup>首先定义了“土地健康”, 并使用“土地疾病”描绘土地功能紊乱。1989年 Rapport D J<sup>[6]</sup>开始了对生态系统健康的研究, 论述了生态系统健康的内涵。伴随着生态系统健康概念的产生, 1998年 Simpson<sup>[7]</sup>提出河流健康的概念并把河流受扰前的原始状态当作健康状态。现将“健康”这一概念引入到农业用水方面, 作为一个新兴的词汇, 农业用水健康是在与生态、河流健康相类比的基础上提出的, 其涵义还处于探讨阶段。

农业用水健康性概念的构成要素为农业、资源利用和健康性。农业有广义和狭义之分, 广义的农业是指包括农、林、牧、渔的大农业; 狭义的农业单指种植业。本文提到的农业系指广义的农业, 农业用水主要指农、林、牧、渔各业用水。资源利用是指可利用的自然资源、科技资源和社会经济资源等。自然资源包括: 水资源、土地资源、气候资源等; 科技资源主要包括: 节水技术运用、节水水平等; 社会经济资源指: 地区经济投入、劳动力机械动力投入等。健康性是对农业用水系统内部结构的评判及系统功能发挥的判断。

农业用水健康系指充分利用区域的经济技术优势, 合理配置外部自然资源、人力资源、资金投入, 优化农业用水结构, 改善农业水利工程及农业水管

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(50809055); 国家科技基础性工作专项(2006FY210300); 国家“863”计划项目(2006AA100217); 国家科技支撑计划(2007BAD88B10); 西北农林科技大学青年学术骨干项目

作者简介: 孙琦伟(1984—), 女, 内蒙古锡林浩特人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: qiwei - 616@163.com。

\* 通讯作者: 吴普特(1963—), 男, 陕西武功人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: gjzwpt@vip.

sina.com。

理水平,提高农业用水效率,使有限水资源达到综合效益的最大,实现社会、经济和生态平衡持续发展。农业用水健康的科学内涵包括:合理配置外部资源;优化农业用水结构;提高农业用水效率;综合效益最大化。农业用水健康具有时空变异属性。首先,农业用水健康性具有时间特性。如相同区域不同时间年,其社会、经济、科技发展水平及人口素质的差异使得评判农业用水健康的标准有所不同,在以前认为是合理健康的农业用水在新的条件下不一定是健康的。而目前被评定为健康的农业用水同样不适应以前的评判标准。从这个意义上来讲,农业用水健康性评价也是一个随着时间的推移,科技的进步在不断发展和完善的过程。其次,农业用水健康性具有地域特性。如不同区域由于其不同的经济技术优势和资源状况,应当制定不同的发展策略,充分发挥地域性优势。对于经济技术较发达地区应当优先发展高投入的节水技术和设施,因为高投入往往意味着高产出。而发展相对落后的地区应当充分考虑区域自然、人力资源优势,调整农业用水结构,合理配置外部资源,优先发展资源型和人力密集型的农业,扩大区域人力和自然资源的优势,扬长避短,最终达到综合效益最大的目的。

### 1.2 黑河流域农业用水健康性评价标准

黑河流域农业用水健康性的标准应该是特定时期人类利益和生态环境利益的平衡点,因此要确定现阶段黑河流域农业用水健康性的标准,需要从人类和其它生态部分对黑河的需求分析着手。

黑河流域农业用水健康有以下两个方面的特征:一是从协调性来讲,指确定合理的农业用水量,通过优化配置水资源,协调地区之间和地区内部农业用水与其它用水之间的关系,使得农业水资源利用这一复杂系统和谐、可持续发展。以上将黑河流域视作一个整体来分析,目的在于维持整个流域的生态安全尤其是下游地区,通过控制中游地区水资源的过度开发,来实现下游地区生态环境安全,具体表现为人民生活用水充足,绿洲面积不萎缩,荒漠化土地面积不增加,尾间湖不干涸。二是从效率效益来讲,指提高农业用水效率及效益,通过充分发挥区域的自然、社会及经济资源优势,提高农业用水效率及其管理水平,使农业综合效益最大化。以上从行政区域角度将黑河流域划分为 11 个县市,其农业用水健康即是指 11 个县市的农业用水健康。具体表现是指各县市实现农业种植结构优化、农业节水技术广泛应用、单方水农业产值提高、农业用水综合效益最大。

## 2 农业用水健康性评价理论与技术基础

### 2.1 农业用水健康性评价理论基础

目前没有专门针对农业用水健康性评价的理论,在分析农业用水健康科学内涵的基础上,认为可持续发展区域的水资源配置理论、综合效益最大理论及系统理论等 3 个,对于农业用水健康性评价具有理论指导意义。

一是可持续发展区域的水资源配置理论。该理论于 2003 年由冯耀龙等<sup>[8]</sup>提出,以追求水资源配置的经济、社会以及生态环境的整体效益最好为目标,是未来水资源配置研究的发展方向<sup>[9-12]</sup>。由于水资源的有限性,可持续发展必然是农业用水的必由之路,农业用水健康遵循人口、资源、环境和经济协调发展的原则,在保护生态环境(包括水环境)的同时,促进经济增长和社会繁荣。同时,区域的可持续发展是综合效益理论在时间线上的表现。二是综合效益最大理论即生态—经济—社会耦合发展理论。农业用水健康性评价应当充分考虑区域社会发展目标、经济发展目标和生态环境保护目标等多个方面,做到能够准确地评价区域农业用水健康的综合效益,保证粮食安全和生态安全。三是系统理论。农业用水健康系统是具有层次结构和整体功能的复合系统,是承载各个功能的主体,由资源利用效率、农业用水结构、农业用水效率和效益组成,它们之间既相互联系,又相互制约。应从它们的耦合机理上,综合考虑农业用水健康对地区人口、资源、环境和经济协调发展的影响<sup>[13]</sup>。因此,系统理论也是农业用水健康研究的基本理论之一。

综上,可持续发展的水资源配置理论是农业用水健康的基础;综合效益最大理论是实现农业用水健康的根本目标;系统理论是实现系统各组成部分功能正常发挥的途径。综合效益和可持续发展这两个功能通过农业用水健康系统得以发挥,这两者相辅相成互相促进,谈综合效益的同时绝不能忽略持续发展。如果综合效益最大的代价是丢弃持续发展,这就不符合系统的整体发展观念;如果只强调持续发展忽略效益,是不符合事物发展规律的,失去了系统发展的动力。两种情况均不能真正实现农业水资源利用的健康发展。

### 2.2 农业用水健康性评价技术基础

农业用水健康性评价目前尚未建立起完整的评价指标体系和统一的评价方法。合理性配置理论是农业用水健康性理论的基础,因此农业用水健康性

评价在指标选取和评价方法上,可借鉴水资源合理配置评价的研究成果。

我国的水资源合理配置研究历史有40 a左右,从最初的“以需定供的水资源配置模式”到“以供定需的水资源配置模式”,再到“基于宏观经济的水资源配置模式”发展到目前的“可持续发展的水资源配置模式”<sup>[14]</sup>。不仅重视地区对水资源的需求和供给,还强调了水资源配置与地区宏观经济的协调发展,同时保证人口、资源、环境、经济的可持续发展。上述研究成果体现在农业用水健康性的农业资源利用上,水资源作为农业资源的关键因子,必须遵循可持续发展的水资源配置模式,确定合理的农业用水量,实现社会、经济、生态的协调持续发展。在水资源合理配置评价指标选取上,1998年王建生等<sup>[15]</sup>为分析我国各地区水资源的紧缺程度,选择水资源量、社会经济、供水、需水、缺水和水环境6个方面共24项指标,建立了水资源紧缺程度综合评价指标体系,对80个流域二级区分3个水平年进行了评价。2004年耿雷华<sup>[16]</sup>以全国水资源总体规划对水资源合理配置评价指标为要求,考虑了水资源合理配置评价的复杂性和特殊性,提出了水资源合理配置的评价指标体系及构建评价指标的6条原则,并认为水资源配置的评价准则包括社会合理性、经济合理性、生态环境合理性、效率合理性和开发合理性准则5个方面。

随着现代计算机技术的进步,一些先进的优化算法应运而生,人工神经网络、遗传算法、粒子群算法、投影寻踪等为农业用水健康性评价计算提供了便捷工具。2003年王顺久等<sup>[17]</sup>提出水资源承载力综合评价的投影寻踪新方法,它是根据数据群自身的特征、结构和信息进行评价分析,将多元数据的信息压缩为一个能反映原问题特征的综合信息指标,并依据此特征信息指标对水资源承载力进行综合分析。2004年吴泽宁等<sup>[18]</sup>将多属性效用理论与BP神经网络理论相结合,建立了水资源利用效果评价的效用模拟BP网络综合评价模型,并以2010水平年黄河流域水资源调控方案为例进行效果评价。2006年罗利民<sup>[19]</sup>以区域经济发展与环境保护相协调为目标,建立了水资源多目标配置模型,同时采用了协同进化算法,取得了较好的计算结果。上述水资源评价指标选取和评价方法运用的相关研究成果,都较好地为农业用水健康性评价提供了有利的技术支持。

### 3 黑河流域农业用水健康性现状

1949年以来,黑河流域在节水工程建设方面取

得了较大成就,中游张掖地区、酒泉地区和嘉峪关市的走廊部分,共有干渠192条,总长度2 545 km,平均衬砌率为57.5%;支渠731条,总长度2 927 km,平均衬砌率65.5%;斗农渠11 772条,总长度8 406 km,平均衬砌率36.4%,张掖盆地内各计算单元引河水和泉水的灌溉水利用系数可达到0.49~0.57,平均为0.55<sup>[20]</sup>。依据黑河流域大量农业用水事实,可判定该区几十年来虽然取得巨大成就,但还存在以下几个问题:

#### (1) 农业用水比重过大

2005年黑河流域农业用水比重为87.15%,相当于我国1980年农业用水比重水平,而同期全国平均农业用水比重仅为63.6%(2005年水资源公报)。截止2005年,黑河流域11县市有7县市农业用水比重在90%以上,农业用水比重过大,直接导致该区生态、生活和工业用水无法保证。此外,黑河流域农业用水内部农、林、牧、渔业用水结构也极不合理,黑河流域甘肃地区农田灌溉用水除肃南和临泽为75%、肃州为82.2%外,7县均占90%以上(2005年甘肃省水利统计年鉴)。因此,黑河流域的用水状况远远没有达到社会、经济和生态健康发展的最佳状态。

#### (2) 农业用水效率低下

缺乏节约用水、科学灌溉的概念。长期以来,由于传统观念的影响,人们认为水资源古已有之,没有价值,取之不尽,用之不竭。故在农业用水上表现为,一方面,水资源浪费严重,认为灌得越多越高产,致使一些地区次生盐碱化严重。中游干流地区农田灌溉毛定额平均达1 036 m<sup>3</sup>,远高于该区域200~300 m<sup>3</sup>的规定。另一方面,中游地区引水口门、平原水库过多,渠系布局不合理,目前黑河干流有各类引水口门66个,年引水量最小的仅为50万m<sup>3</sup>,现有平原水库40座,总有效库容7 900万m<sup>3</sup>,实际蓄水深度大部分在2 m左右,水库蒸发、渗漏损失占总蓄水量的30%~40%。

#### (3) 农业用水经济效益不显著

黑河流域受到水资源、生态环境等条件的制约,以消耗水资源为发展条件的粮食生产限制了农业用水经济效益的发挥。由于历史原因,黑河流域农业生产中存在严重的产业结构缺陷,片面追求规模,生产性低耗水而结构性高耗水,水分消耗大而经济效益低。不仅灌溉面积大,而且高耗水作物种植面积大。根据文献<sup>[21]</sup>2005年北京市农业用水效益(5%的增长率)达到2.92元/m<sup>3</sup>,同年黑河流域包括畜牧业在内的农业用水效益为1.5元/m<sup>3</sup>,仅为前者的

1/2(计算数据来源于文献[4])。如果这种低经济效益的农业用水不能从根本上得到解决,既不可能实现全流域水资源的可持续利用,也不可能实现黑河各县区农业、农村经济和国民经济的可持续发展。

综上所述,黑河流域农业用水仍然存在许多问题,由于农业用水系统的复杂性,欲想得到准确的评价结果,必须选取反映农业用水健康的指标并建立健康性评价指标体系,运用数学方法进行评价。

#### 4 农业用水健康性评价指标体系的建立

本研究根据农业用水健康性科学内涵和评价标准,结合黑河流域农业用水特征,从资源利用效率、农业用水结构、农业用水效率和用水综合效益 4 个方面初步选取了 20 项指标来构建指标体系。该指标体系用统一尺度度量系统发展状况水平,衡量与农业用水系统健康状况有关各部分的特点。农业资源利用包括:气候、土地和劳动力资金资源的利用程

度。农业用水结构表示农业用水各部的组成,包括宏观结构:农业、工业、服务业用水;中观结构:种植业、林、牧、渔用水;微观结构:粮食作物、经济作物、饲料作物用水。农业用水效率表示区域农业用水水平的高低,主要指水资源开发程度和农业节水水平。用水综合效益包括:社会效益、经济效益、生态效益 3 个部分。再者,建立综合目标及其要素间的对应关系,根据有关理论或实证分析研究<sup>[22-24]</sup>定量指标与评价准则及综合目标的相关程度,从而确定指标的选择和设置。由农业用水健康性的科学内涵,充分考虑农业用水健康的社会目标、经济目标和生态目标的要求,依据评价标准拟定建立农业用水健康性评价指标如表 1 所示。

#### 5 结论

实现农业用水健康是缓解黑河流域水资源紧张和生态环境持续恶化的关键,是黑河流域生态—经济—社会这一复杂系统和谐、可持续发展的根本保证。

表 1 农业用水健康性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for health of agriculture water consumption

指标层 Target layer	准则层 Criteria layer	准则子层 Sub-criteria layer	指标层 Indicator layer	
黑河流域 农业用水 健康 Health for agricultural water consumption in the Heihe River Basin	资源利用效率 The efficiency of resource use	气候资源利用 Climate resources utilization	光能利用率 Utility rate of luminous energy 热量利用率 Heat utilization ratio 降水利用率 Precipitation utilization ratio	
		土地资源利用 Land resource utilization	土地生产效率 Land utilization rate 复种指数 Multiple crop index	
		人工投入资源 Human resources investment	资金生产率 Fund production ratio 劳动净产值率 The net output ratio of labor	
		宏观 Macro-view	农业用水比重 Ratio of agriculture water consumption	
		中观 Middle-view	林牧渔业用水占农业用水比重 Ratio of forestry; animal husbandry, fishery water consumption	
		微观 Micro-view	粮食作物用水比重 Ratio of food crop water consumption	
	用水效率 Water use efficiency	水资源开发 Water resources development	地表水开发利用 Development ratio of ground water 地下水开发利用 Development ratio of underground water	
		农业水资源转化效率 Water resources efficiency	水资源重复利用率 Ratio of water reuse 灌溉水有效利用系数 Water efficiency of irrigation 节水灌溉面积比率 Ratio of water - saving irrigation area	
		用水效益 Water use benefits	经济效益 Economic benefits	单方水农业净产值 Unilateral water agricultural net output value
			社会效益 Social benefits	人均粮食占有量 Per-capita share of grain 农村人均年净收入 Net income of rural residents
			生态效益 Ecological benefit	河流生态用水比率 Ratio of ecological water use for river
				盐渍化耕地面积治理比率 Govern ratio of the governance area of the soil salinization farmland

本文在分析了农业用水健康科学内涵的基础上,提出了黑河流域农业健康用水评定标准。在国内相关研究的基础上,结合我国黑河流域农业用水现状和特点,经过认真筛选和分析,以资源利用效率、用水结构、用水效率和用水效益4个方面为准则,初步选择了20项指标构建了黑河流域农业用水健康性评价的指标体系。根据评定标准,可定性地判断出黑河流域农业用水仍不够健康,存在农业用水比重大、用水效率低、经济效益差等问题。欲进一步对黑河流域农业用水健康进行定量判断,必须建立健康性评价指标体系,采用一定的数学方法例如:层次分析法、模糊综合评价法、专家系统以及人工神经网络、投影寻踪算法进行评价,才能得到定量结果。

#### 参考文献:

- [1] 高前兆,李福兴.黑河流域水资源合理开发利用[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1990:18—21.
- [2] 张凯,宋连春,韩永翔,等.黑河中游地区水资源供需状况分析及对策探讨[J].中国沙漠,2006,26(5):842—848.
- [3] 张凯,韩永翔,张勃,等.基于水资源和气候系统影响下的黑河流域生态环境变迁研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):159—173.
- [4] 代锋刚,蔡焕杰,张鑫,等.西北干旱内陆河流域生态需水量理论初探[J].干旱地区农业研究,2004,22(3):148—153.
- [5] Leopole A. Wilderness as a land laboratory[J]. Living Wilderness, 1941,6(2):3.
- [6] Rapport D J. What constitutes ecosystem health? [J]. Perspectives in Biology and Meedicine, 1989,33:120—132.
- [7] Simpson J, Norris R, Barmuta L, et al. Aus Riv AS-National River Health Program[R]. Australia: Cooperative centre for freshwater ecology, 1999.
- [8] 李令跃,甘泓.试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J].水科学进展,2000,11(3):307—313.
- [9] 王顺久,侯玉,张欣莉,等.中国水资源优化配置研究的进展与展望[J].水利发展研究,2002,2(9):9—11.
- [10] 许新宜,王浩,甘泓,等.华北地区宏观经济水资源规划理论方法[M].郑州:黄河水利出版社,1997:42—48.
- [11] 李令跃,甘泓.试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J].水科学进展,2000,11(3):307—313.
- [12] 姚治君,王建华,张东,等.区域水资源承载力的研究进展及其理论探讨[J].水科学进展,2002,13(1):111—115.
- [13] 耿雷华,王建华,刘翠善.浅谈水资源合理配置评价指标体系[J].水利规划与设计,2004,(3):57—59.
- [14] 王浩,游进军.水资源合理配置研究历程与进展[J].水利学报,2008,39(10):1168—1175.
- [15] 王建华,徐子凯,姚建文,等.我国现状用水主要指标分析[J].水利规划与设计,1998,(3):19—25.
- [16] 耿雷华,王建华,刘翠善.浅谈水资源合理配置评价指标体系[J].水利规划与设计,2004,(3):57—59.
- [17] 王顺久,侯玉,张欣莉,等.流域水资源承载力的综合评价方法[J].水利学报,2003,1(1):88—92.
- [18] 吴泽宁,崔萌,曹茜,等.BP网络模型在水资源利用方案评价中的应用[J].南水北调与水利科技,2004,2(3):25—28.
- [19] 罗利民,谢能刚,仲越,等.区域水资源合理配置的多目标博弈决策研究[J].河海大学学报,2007,35(1):72—76.
- [20] 潘世兵,路京选,张建立,等.黑河流域水资源开发与生态保护中几个问题的探讨[J].干旱区研究,2006,23(2):236—240.
- [21] 陈兴苗,刘树坤.论经济合理的生态用水量及其计算模型(II)—应用[J].水利水电科技进展,2006,26(6):1—5.
- [22] 彭汉良.种植制度决策支持系统的研究[D].南京:南京农业大学,2003.
- [23] 宋松柏.区域资源可持续利用指标及评价方法研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [24] 吴景社,康绍忠,王景雷.节水灌溉综合效应评价指标的选取与分级研究[J].灌溉排水学报,2004,23(5):17—19.

## Research on health and its method assessment in the Heihe River basin for agricultural water consumption

SUN Qi-wei<sup>1,2</sup>, WU Pu-te<sup>1,2,3,4\*</sup>, WANG Yu-bao<sup>2,3</sup>, ZHAO Xi-ning<sup>2,3,4</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** This paper evaluates qualitatively the health for agriculture water use and discusses preliminarily the quantitative evaluation methods in the Heihe River basin. Rational agriculture water use is the key to solve the growing tension of water resources and continued deterioration of the ecological environment, and the health assessment of agriculture water use is the base whether reasonable for agriculture water use. The paper analyses the concept of the health of agriculture water use, explains the evaluation criteria and theoretical and technological base of health assessment for agriculture water use. According to coordination and efficiency standard, it can evaluate qualitatively that the water use is not healthy. To the purpose of quantitative evaluation, the study takes resources use efficiency, water use structure, water use efficiency and benefit as regulation, selects initially twenty indexes as index system of health assessment for agriculture water use.

**Keywords:** the Heihe River basin; agricultural water consumption; health assessment