

以灌区小流域为单元进行节水和非点源污染管理的探讨^①

代俊峰, 崔远来, 蔡学良, 董 斌

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 分析了灌区节水和非点源污染存在尺度效应的原因和机理, 针对田间尺度不能代替灌区尺度、而灌区尺度又过于复杂的特点, 提出灌区小流域的尺度概念。灌区小流域既是灌区流域的基本生态结构单元, 又是田块这一更小尺度的集合体。论述以灌区小流域为单元进行节水和非点源污染管理的可行性和必要性, 并对灌区小流域节水和非点源污染管理的研究内容和研究方法提出参考意见。

关键词: 灌区小流域; 节水; 非点源污染; 尺度效应

中图分类号: S274

随着灌区田间尺度的水分管理、节水技术和养分管理^[1-4]等研究的不断深入, 灌区尺度的节水和非点源污染已引起人们的普遍关注。由于节水灌溉和非点源污染存在空间尺度效应, 在不同空间尺度上如何正确理解和应用节水措施、田间节水措施对灌区(流域)水分循环和生态环境的影响如何以及如何治理灌区尺度的非点源污染问题等, 已成为农田水利和相关学科关注的重点^[5-6]。鉴于灌区生态格局的复杂性, 有必要对灌区流域进行单元划分, 以便在更合理的空间尺度上实施节水和非点源污染管理的研究。针对这个问题, 本文提出灌区小流域的概念, 并对灌区小流域上节水和非点源污染管理研究的重要性和可行性进行探讨。

1 节水、非点源污染尺度效应的成因概述

水文学中的尺度包括空间范围的大小和时间周期的长短, 而节水和非点源污染更多关注的是空间尺度, 农田灌溉中的空间尺度可分为小尺度(田间)、中等尺度(灌溉系统)和大尺度(灌区、流域)^[7]。

节水尺度效应是指节水措施在各个尺度上的节水效果以及一种尺度上的节水效果在其他尺度上的影响^[8]。节水尺度效应产生的原因主要是回归水及其重复利用^[9]。回归水是指自然降雨和灌溉水由田间、渠道排出或渗入地下并汇集到沟、渠、河道和地下含水层中成为可再利用的水源。田间尺度内未被利用的回归水流入中等尺度; 中等尺度的回归水, 一部分被土壤、塘堰截流, 一部分渗入地下水层, 另一部分经排水沟汇集到下游的小型水库、湖泊等水体, 作为灌溉水源被重新利用, 最后流出中等尺度; 灌区尺度则布满了

许多井、渠等供水设施和水库、塘堰、河流湖泊等水体, 灌区内的地表水体和地下水体收集回归水, 并在灌区内重复利用, 未利用的回归水则流入其他灌区流域。

非点源污染是指: 溶解态或固态污染物, 从非特定的地点通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库等)引起的水体污染^[10]。非点源污染主要由不当的农业活动造成^[11]。灌区内田间过量施用的化肥^[12]、农药^[13-14]以及农业农村废弃物, 在降雨、径流和灌溉排水作用下渗入灌区的地下水层或汇入水库、河流、湖泊, 引起灌区的地下水污染和水体污染。灌区内非点源污染的形成不仅受到物质来源、下垫面性质的影响, 还受到降雨、灌溉、地表和地下水文等过程的影响, 从而导致灌区内非点源污染尺度效应的存在。

2 基于灌区小流域节水和非点源污染管理概念的提出

节水和养分管理存在尺度效应, 田间尺度的研究成果难以真正地反映灌区的实际情况, 而灌区尺度上的研究又受诸多因素的限制, 并且不同灌区的空间尺度又存在差异, 有必要在田间尺度和灌区尺度上寻找过渡的空间尺度, 因此我们提出灌区小流域的概念。

灌区小流域可以定义为灌区内面积为 5 ~ 20 km² 的闭合集水区, 是降雨径流和排水汇集的最小单元, 是水土、养分流失发生过程的最小单元。灌区小流域可以是灌区内某段干渠、分干、支渠、中型水库、地下水库等水源控制的灌溉范围。

灌区小流域可视为若干田间尺度的集合体。从田

^①基金项目: 国家自然科学基金(50579059)、教育部博士点基金(20050486002)及教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0664)资助。

作者简介: 代俊峰(1980—), 男, 河南襄城人, 博士研究生, 主要从事节水与水资源最优规划与管理研究。E-mail: whudjf@163.com

田间尺度到灌区小流域尺度,地形地貌、水分养分等相关要素的空间变异很大,可以反映从田间尺度到灌区尺度的相关要素的空间变异性。而且田间尺度上的节水和养分管理措施都会对其所在的小流域产生影响,使得灌区小流域与灌区一样,在水分、养分、污染物管理等方面呈现复杂性。小流域在灌区内可被视作基本的生态系统,从灌区小流域到灌区尽管有差异,但其差异不大,而且这种差异可以用数学方法进行描述。从物质能量交换的角度看,灌区小流域具有一定程度的闭合性,而且具有空间特征的完整性。

因此,从田间尺度研究到灌区小流域尺度,应该可以揭示水分、养分和非点源污染的尺度效应及其内在机理。也就是说灌区小流域基本上反映了灌区水分、养分、污染物转化运移的复杂程度、空间变异及尺度效应。若再增加空间尺度,只是增加数据的量及获取数据的困难。以灌区小流域为研究单元,有助于合理地评价田间水分、养分管理的尺度效应,也易于小流域的研究成果向灌区尺度推广。

3 灌区小流域节水和非点源污染管理的研究

3.1 研究内容

(1) 灌区小流域水分生产率和水分利用效率的研究。由于灌区地形、水文、人类活动的复杂性,灌区的水分生产率和水分利用效率难以体现灌区内不同区域之间的差异性,而田间尺度的数据又由于过于简化而无法考虑大尺度条件下水分转化的复杂性。将灌区划分为不同的小流域,进行相关项目的研究,利用小流域的相对闭合性,可以对其变化规律进行定量分析,从而为节水的实施提供参考。

(2) 从田间尺度到灌区小流域尺度水量转化及其尺度效应。从田间尺度到灌区尺度节水及非点源污染管理的难点,主要是在不同尺度间水量转化的非线性及由此产生的尺度效应。由于灌区小流域具备灌区尺度的复杂特征,若解决了从田间尺度到灌区小流域尺度水量转化的定量描述,也就可以将其推广到灌区尺度。因此,我们可以重点研究田间、小流域尺度水分传输模型与节水调控问题的结合,不同尺度模型的耦合技术,特别是从田间到小流域尺度水量转化的尺度放大理论及方法等。

(3) 田间尺度的节水灌溉措施推广到灌区小流域时的节水潜力。田间采取灌溉节水措施后,减少了渠道渗漏、田间渗漏和地表流失量等可回收水量,而从田间流入塘堰、水库、河流湖泊等水体和地下含水层的可回收水量在更大尺度上是可以重复利用的。由于

在灌区尺度上实施水量平衡观测的困难性,因此以灌区小流域为单元,进行闭合区域水平衡要素的观测及分析,可定量研究从田间尺度到大尺度的水量转化过程,评价田间节水灌溉措施推广到灌区小流域时的节水潜力。

(4) 综合节水措施优化抉择。节水措施的目标包括提高灌溉水利用率和农田水分生产率、增产增收、实现水资源可持续发展、改善农业生产条件等,节水措施包括工程节水措施、管理节水措施和农艺节水措施等三大类型,而每一类型又可进一步细分,三大措施的综合运用可以组成很多种组合方案。而大型灌区节水最优组合方案的选择比较难以操作,可以以灌区小流域为单元,根据小流域的实际情况确定节水措施的目标,再根据节水目标选择可行的综合节水措施,最后使整个灌区的节水措施达到最优。

(5) 节水与涵养水源的协调发展。节水措施若管理不当,则可能对区域水环境产生负面效应^[15]。节水不是孤立的行为,应与区域的水源涵养协调发展。在有限水源的情况下,节水是有限度的;在水源丰富的情况下,则要考虑节水后水量转移问题。以灌区小流域为单元,综合评价小流域的水资源状况和用水情况,考虑经济效益、生态效益和社会效益,促使节水与水源涵养的协调发展,才能维持区域水资源的良性循环。

(6) 合理安排种植结构,有效利用区域水资源。灌区尤其是大型灌区,地形、地貌差异较大,灌溉水源分布不均,灌排系统运行状况不一,而农业生产又具有分散性,往往造成农业种植结构与灌区局部水资源可利用量的不一致性。从灌区小流域的角度出发,首先评价小流域的水资源状况,分析小流域的农业可利用水量,考虑灌区内小流域间调水的可调水量及调水成本,确定农业种植结构。可用水量不丰富的小流域,应采用节水措施,并种植低耗水作物;可用水量丰富的小流域,节水后使多余的水量用来发展附加值高但耗水量大的经济作物。

(7) 灌区小流域环境保护。田间施用的肥料和农药在灌区系统内的运移会造成灌区的环境污染,而且田间污水灌溉中未被作物吸收利用的养分及污染物进入灌区系统,也会破坏灌区的生态环境。污水灌溉及其对环境的影响也成为农业生态环境等领域日益关注的重要课题^[16]。由于溶质随着水分运移,从田间到灌区尺度的溶质运移及其转化也存在尺度效应,因此,可将灌区尺度离散,在小流域尺度上研究非点源污染的分布、运移、转化、积聚等规律。根据灌区小流域的环境承载能力,科学施肥、制定污水灌溉标准,保证

各个小流域的环境质量和饮水安全,从而促进灌区农业的可持续发展。

3.2 研究手段

(1) 试验观测。根据地形、渠系分布和水源状况,划定相对闭合的试验区,进行出入水量和相关要素的观测。通过田间、灌区小流域的水量平衡和作物产量的分析,可以理解尺度效应产生的原因。但较大尺度上水量平衡各要素的观测非常困难,而且传统的数据分析方法也难以揭示尺度效应形成的内在机理。

(2) 统计自相似性分析。在假设灌区具有较严格自相似性的前提下,分形理论有助于理解流域响应的尺度转换行为,借助于统计自相似性分析可表达出水文尺度转换的统计特性。但分形理论在灌区应用时,不可避免地会碰到灌区自相似性差的问题,统计自相似性也无法解释尺度转换的内在机理^[17],因此这两种数学方法在尺度效应方面的应用精度有待提高。

(3) 模型模拟。模型模拟可以弥补试验观测和数学分析方法的缺陷,目前应用在水文和非点源污染管理领域的模型包括田间尺度模型和分布式流域模型。应用较多的模拟作物生长及水分运移的田间尺度模型有 ORYZA 模型^[18]、SWAP 模型^[19]等。基于 GIS 的分布式流域模型,将研究区域离散为不同的单元来进行模拟,这样可以全面地反映人类活动对流域水文过程、养分循环的干扰。广泛应用的分布式流域水文模型也比较多,如用于流域水文模拟的 SLURP 模型^[20];模拟不同尺度地面水、地下水相互转化的 MODFLOW 模型;描述下垫面属性空间变化对流域水文循环过程影响的 TOPMODEL 模型;预测人类活动对复杂流域水、沙、农业化学物质的长期影响的 SWAT 模型^[21]、SHE 模型等。

值得注意的是,目前的分布式模型虽是针对自然流域的研究而发展的,也可用来进行灌区水分平衡、养分循环和作物生长的模拟,但应用其进行灌区节水灌溉和非点源污染管理的模拟精度则有待于进一步检验,而且有必要开发针对灌区水分、养分等研究的灌区水文模型。由于灌区流域的特殊性和复杂性,须将田间尺度作物模型和流域水文模型结合起来,才能更好地进行灌区节水和非点源污染管理的研究。

4 结语

将灌区划分为多个小流域,以灌区小流域为单元进行节水和非点源污染管理,不仅易于吸收田间尺度的相关研究成果,也可以为灌区尺度的水分和养分管理提供参考。而且,从我国目前的灌区管理体制、农业生产格局等方面考虑,以灌区小流域为单元进行节

水和非点源污染管理的效率应该是比较高的。

参考文献:

- [1] 茆智,崔远来,李新健.我国南方水稻水分生产函数试验研究.水利学报,1994,9:22-31
- [2] 茆智.水稻节水灌溉及其对环境的影响.中国工程科学,2002,4(7):8-16
- [3] Wang XY, Xie HT, Liang WJ, Wen DZH. Rice yield and water use as affected by soil management practice. Pedosphere, 2004, 14(3): 331-337
- [4] 何园球,李成亮,王兴祥,熊又升,沈其荣.土壤水分含量和施磷量对旱作水稻磷素吸收的影响.土壤学报,2005,42(4):629-635
- [5] 崔远来,董斌,李远华.水分生产率指标随空间尺度变化规律研究.水利学报,2006,37(1):56-62
- [6] 董斌,崔远来,李远华.水稻灌区节水灌溉的尺度效应.水科学进展,2005,16(6):833-839
- [7] Molden L, Sakthivadivel R. Water accounting to assess use and productivity of water. Water Resource Development, 1999, 15(1/2):55-71
- [8] 茆智.发展节水灌溉应注意的几个原则性技术问题.中国农村水利水电,2003,3:19-23
- [9] 崔远来,董斌,邓莉.漳河灌区灌溉用水量及水分生产率变化分析.灌溉排水,2002,21(4):4-8
- [10] Line DE, McLaughlin RA, Osmond DL, Jennings GD, Harman WA, Lombardo LA, Spooner J. Nonpoint Sources. Water Environment Research, 1998, 70(4):895-912
- [11] 单艳红,杨林章,王建国.土壤磷素流失的途径、环境影响及对策.土壤,2004,36(6):602-608
- [12] 段永惠,张乃明,张玉娟.施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究.土壤,2005,37(1):48-51
- [13] 陈中云,闵航,张夫道,赵秉强.农药污染对水稻田土壤硫酸盐还原菌种群数量及其活性影响的研究.土壤学报,2004,41(1):97-102
- [14] 李顺鹏,蒋建东.农药污染土壤的微生物修复研究进展.土壤,2004,36(6):577-583
- [15] 周维博,李佩成.我国农田灌溉的水环境问题.水科学进展,2001,12(3):413-417
- [16] 康绍忠,蔡焕杰,冯绍元.现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点.农业工程学报,2004,20(1):1-6
- [17] Menabde M, Sivapalan M. Linking space-time variability of river runoff and rainfall fields: A dynamic approach. Advance Water Resource, 2001, 24: 1001-1014
- [18] Bouman BAM, van Keulen H, van Laar HH, Rabbinge R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: Pedigree and historical overview. Agricultural Systems, 1996, 52: 171-198
- [19] Kite G, Droogers P. Irrigation modeling in the context of basin

- water resource. *Water Resources Development*, 1999, 15 (1/2): 1-13
- 43-54
- [20] Kite G. Modelling the Mekong: Hydrological simulation for environmental impact studies. *Journal of hydrology*, 2001, 253: 1-13
- [21] Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi C, Arnold JG. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes*, 2005, 19: 749-762

Water-Saving Irrigation and Non-point Source Pollution Management in Small Watershed of Irrigation System

DAI Jun-feng, CUI Yuan-lai, CAI Xue-liang, DONG Bin

(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: Mechanisms of scale effect on water saving irrigation and non-point source pollution were analyzed. Because of scale effect, field scale can't be used as a substitute for irrigation system scale, and irrigation system scale was too complex for study, therefore, the concept of small watershed of irrigation system (SWIS) was defined. Being the basal ecology unit of irrigation system, SWIS was also an aggregation of a number of fields, a much smaller scale unit. Feasibility and significance of water saving irrigation and non-point source pollution management in SWIS were demonstrated, and then comments and opinions were brought forth on contents and methods of studies on water saving irrigation and non-point source pollution management in SWIS.

Key words: Small watershed of Irrigation system (SWIS), Water saving irrigation, Non-point source pollution, Scale effect