



基于农田水土环境安全的 盐渍化灌区生态施肥模式研究

杨树青 史海滨 刘德平 李瑞平 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于农田水土环境安全的 盐渍化灌区生态施肥模式研究

杨树青 史海滨 刘德平 李瑞平 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

全书共分 12 章,第 1 章为引言;第 2 章为研究区概况;第 3 章为氮磷配施模式下小麦、玉米套作产量效应研究;第 4 章为氮磷配施模式下小麦、玉米套作水肥利用效率研究;第 5 章为氮磷配施模式下小麦玉米套作氮素吸收、转运及平衡研究;第 6 章为基于作物临界氮浓度的施肥诊断研究;第 7 章为农田土壤剖面中氮素淋溶损失研究;第 8 章为氮磷配施模式下小麦玉米套作土壤酶活性研究;第 9 章为区域地下水埋深时空变异特征研究;第 10 章为地下水与土壤盐渍化的互作效应研究;第 11 章为综合农业节水条件下灌溉水利用效率及不同种植模式作物最适灌水量的研究;第 12 章对上述研究进行了总结和展望。

图书在版编目(CIP)数据

基于农田水土环境安全的盐渍化灌区生态施肥模式研究 / 杨树青等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2016.12
ISBN 978-7-5170-4870-1

I. ①基… II. ①杨… III. ①盐化—灌区—施肥—制度—研究 IV. ①S365

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第267564号

书 名	基于农田水土环境安全的盐渍化灌区生态施肥模式研究 JIYU NONGTIAN SHUITU HUANJING ANQUAN DE YANZHUA GUANQU SHENGTAI SHIFEI MOSHI YANJIU
作 者 出版发行	杨树青 史海滨 刘德平 李瑞平 著 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版 印 刷 规 格 版 次 定 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京中献拓方科技发展有限公司 170mm×240mm 16 开本 11.5 印张 219 千字 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷 45.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

内蒙古河套灌区是我国重要粮食产区，灌溉条件优越，水量充足，是具有悠久历史的典型灌区。灌区现存在以下问题：一方面，灌区作为我国土壤盐渍化发育的典型地区，轻度盐渍化土壤占耕地面积 24% 左右，中度、重度盐碱化土壤占耕地面积 31% 左右，严重威胁了灌区粮食生产安全；另一方面，该区域农业生产过程中存在施肥结构单一、比例不均等问题，化肥用量呈逐年加大的趋势，而肥料的利用率却一直得不到提高，施用的化肥除了被农作物部分吸收外，其余都在农田灌溉、降雨及秋浇时随退水进入各级排干沟及地下水中，超过了农业灌溉水源所能承受的环境容量，将严重威胁着黄河水质的安全，使得农业面源污染成为黄河上游灌区水环境质量改善的严重制约因素。可见，土壤盐渍化与化肥的合理施用是该区域人们普遍关注的焦点问题。本书通过区域尺度、田间尺度的多年野外试验研究，初步确定了维持区域水土环境良性循环的生态地下水位阈值，在此基础上提出了基于农田水土环境安全角度的盐渍化灌区生态施肥模式，为进一步减轻农业面源污染提供理论依据。

在多年野外田间试验及室内实验的基础上，针对盐渍化耕地，分析生态施肥条件下作物产量、水肥利用效率、氮素转运及平衡的变化规律；建立临界氮浓度稀释曲线模型，并通过作物植株氮素积累、亏缺及氮营养指数来评价施肥水平，揭示不同施肥条件下土壤氮素残留、灌水及秋浇过程中的氮素淋洗规律，建立土壤尿酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶 4 种土壤酶活性与施肥之间的相关关系，以 4 种土壤酶活性作为评价施肥水平的土壤酶学指标，提出基于土壤-作物系统的盐渍化灌区最适宜的生态施肥模式。同时，通过对地下水埋深与土壤盐渍化交互效应研究，结合灌区各种农作物的耐盐阈值，初步确定维持区域水土环境良性循环的“生态地下水

位”，再由田间水利用系数与地下水补给系数之间的关系，推算田间作物理论最适灌溉用水量。

本书可供水利、农学、土壤专业的本科生、研究生及从事相应专业的科研、教学和工程技术人员参考。李仙岳、田德龙、闫建文、苗庆丰、孙玲玉、苏瑞东、龚雪文、彭遵原等参与了项目的研究工作。

本书由杨树青、史海滨、刘德平、常春龙、马金慧、刘瑞敏、符鲜等撰写，最终由杨树青统稿完成。

由于本研究涉及多学科的交叉内容，书中可能存在缺点和错误，有不足之处请各位专家批评指正。

作者

2016年9月

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状分析	3
1.3 研究目标及有待探讨的科学问题	12
第 2 章 研究区概况	15
2.1 内蒙古河套灌区概况	15
2.2 气候条件	15
2.3 土壤与植被现状	15
2.4 水文地质条件	17
2.5 盐渍化灌区小麦玉米套作优化施肥试验设计	18
2.6 区域尺度试验设计	21
第 3 章 氮磷配施模式下小麦、玉米套作产量效应研究	26
3.1 研究目的	26
3.2 试验设计	27
3.3 样品采集及数据分析	27
3.4 结果与分析	28
3.5 小结与讨论	33
第 4 章 氮磷配施模式下小麦、玉米套作水肥利用效率研究	35
4.1 研究目的	35
4.2 分析及测定方法	36
4.3 氮磷配施模式下套作作物水分利用的研究	37
4.4 氮磷配施模式对套作作物肥料利用效率的影响研究	40
4.5 氮磷配施模式下施肥与产量及水肥利用效率之间的效应研究	43
4.6 小结与讨论	45
第 5 章 氮磷配施模式下小麦玉米套作氮素吸收、转运及平衡研究	47
5.1 研究目的	47
5.2 样品采集及测定	47

5.3	相关参数计算	48
5.4	结果与分析	50
5.5	小结与讨论	59
第 6 章	基于作物临界氮浓度的施肥诊断研究	63
6.1	研究目的	63
6.2	样品采集及测定	63
6.3	研究方法	64
6.4	结果与分析	66
6.5	小结与讨论	73
第 7 章	农田土壤剖面中氮素淋溶损失研究	75
7.1	研究目的	75
7.2	试验设计	76
7.3	结果与分析	83
7.4	小结与讨论	96
第 8 章	氮磷配施模式下小麦玉米套作土壤酶活性研究	99
8.1	研究目的	99
8.2	样品采集及测定	100
8.3	数据分析及处理	100
8.4	结果与分析	101
8.5	小结与讨论	109
第 9 章	区域地下水埋深时空变异特征研究	111
9.1	地下水埋深时间变化动态	111
9.2	地下水埋深空间变异特征	112
9.3	小结	117
第 10 章	地下水与土壤盐渍化的互作效应研究	119
10.1	研究区域地下水埋深对作物生长影响现状	119
10.2	地下水埋深与土壤蒸发量关系	121
10.3	地下水埋深与土层含水率关系	122
10.4	地下水埋深与土壤盐渍化的互作效应	124
10.5	地下水矿化度与土壤盐渍化互作效应研究	129
10.6	主要作物适宜地下水埋深	132
10.7	农田保护策略的初步提出	134
10.8	小结	135

第 11 章 综合农业节水条件下灌溉水利用效率及不同种植模式
作物最适灌水量的研究 137

11.1 综合农业节水条件下干渠尺度灌溉水利用效率研究 137

11.2 综合农业节水条件下不同种植模式下作物最适灌水量研究 141

11.3 小结 150

第 12 章 结论 151

12.1 主要结论 151

12.2 不足与展望 156

参考文献 159

第 1 章 引 言

1.1 研究背景及意义

我国 2003 年 1 月 1 日正式实施的《中华人民共和国清洁生产促进法》有关农业方面的条文指出“农业生产者应当科学地使用化肥、农药、农用薄膜等,防止农业环境污染”。根据联合国粮农组织 (FAO) 统计 (1996),全世界 60% 的灌溉土地已不同程度的盐渍化。内蒙古河套灌区是我国土壤盐渍化发育的典型地区,轻度盐渍化土壤占耕地面积 24% 左右,中、重度盐碱化土壤占耕地面积 31% 左右。近年来,一方面,由于灌区不合理的灌溉制度及排水工程不健全,致使地下水位升高,在强烈蒸发作用下,地下水中的盐分在根层土壤中积聚,导致灌区土壤发生了大规模的次生盐渍化,对农业产生了极大危害,大面积耕地资源因盐渍化而处于荒芜弃耕状态 (Aurelija 等, 2011; Schoups 等, 2005),造成了灌区天然植被的退化和农作物产量降低 (汪林等, 2001); 另一方面,由于长时间的不恰当灌溉及施肥措施,使得肥料利用效率较低,造成较大的肥料流失。可见,土地盐碱化、缺水及农业面源污染等将成为长期制约该地区农业可持续发展的关键因素。

在经历了灌区大水漫灌、重灌轻排而导致的地下水位上升和灌区土壤次生盐渍化后,人们逐渐认识到过深的地下水埋深和过浅的地下水埋深都会对农业和周边的环境产生严重损害。真正原因在于土壤盐分和水分是影响植物生长的主要因素,且均与地下水埋深深浅有关,当地下水埋深过浅时,在强烈的蒸发作用下,水去盐留,溶于地下水中的盐分就会在土壤表层聚积导致盐渍化,不利于灌区作物的生长。当地下水埋深过深时,地下水无法达到植物可吸收利用的程度,导致土壤的干化、植被衰败,严重甚至会导致土地荒漠化 (李和平等, 2008)。因此,只有当地下水埋深处于合理生态水位时,灌区作物植被才能够正常生长 (张天增, 1981),在现有资源条件下,确定河套灌区适合农作物、植被生长的合理地下水埋深势在必行。河套灌区大水漫灌的灌溉方式不仅是导致土壤盐渍化的重要因素,而且还造成了灌区水资源的严重浪费,尤其是面临引黄水量锐减形势,可见,制订合理的灌溉方式,控制地下水位已刻不容缓。河套灌区节水改造工程实施后,建立了完善的排水系统,减轻了土壤盐渍

化程度,盐碱地面积开始减少,作物产量也逐渐提高(张微等,2003)。但土壤积盐情况依然严重,盐分还是没有大量排出灌区外,只是盐分在土层剖面的再次分配,农田潜在盐渍化问题依旧突出,如果田间管理不当、用水不科学、水位抬高,依然会导致土壤次生盐渍化。

内蒙古河套灌区作为我国西北重要的农业精华地区,农业生产过程中化肥、农药用量呈逐年加大的趋势,而肥料的利用率却一直得不到提高,施用的化肥除了被农作物部分吸收外,其余都在农田灌溉、降雨及秋浇时随退水进入各级排干沟及地下水中,导致土壤板结、耕作质量差、肥料利用率低、土壤养分易流失及地下水污染等问题。统计表明,一般农作物对氮肥的吸收利用率为30%左右,70%通过挥发、淋失、渗漏损失,对磷肥的当季吸收利用率为20%左右,约15%随水流失,各排干沟污染物排入量均已超过了农业灌溉水源所能承受的环境容量,将严重威胁着黄河水质的安全,使得农业面源污染成为黄河上游灌区水环境质量改善的严重制约因素。目前,农业生产中无机肥料的应用仍然占主导地位,大多数无机肥料本身并没有什么问题,主要是人们的使用量、使用方法等不合理而造成过多的损失及污染问题,而合理施肥能够显著提高土壤肥力及肥料利用效率,达到维持土壤养分平衡的目的(陈闻等,2011;王飞等,2011;徐祖祥等,2011),不均衡施肥则会导致土壤酸化及养分的大量残留,从而影响作物产量和品质(姜培坤等,2009),氮、磷、钾肥是农业生产过程中主要的养分因素,由本底调查可知,灌区土壤中钾素充足,因此,研究农业生产过程中氮、磷肥合理配施优化施肥是十分必要且尤为迫切的。

综上所述,内蒙古河套灌区农业灌溉用水量大,时间跨度长,尤其是秋浇,不仅把大量盐分淋洗入地下水中,同时,土壤中残留的氮素也被淋洗进入地下水中,这一长期过程对环境造成严重危害性。因此,一方面,本研究在盐渍化灌区节水条件下,兼顾经济效益的同时,合理调节氮、磷肥的施用量,以达到提高作物的水肥利用效率、减少作物收获后土体中硝态氮残留及灌水过程中氮素淋失的目标,提出基于农田环境角度的氮磷配施模式,为进一步减轻农业面源污染提供理论基础,是黄河上游灌区水质安全的重要科技需求及提高灌区农业清洁生产水平和推进现代农业的重要保障,也是黄河中下游水安全和生态安全的重要举措,具有重要的科学研究价值和现实意义。另一方面,要解决河套灌区盐渍化问题,实施作物生长期与主要积盐期浅层地下水位调控是又一重要课题与途径(杨会峰等,2011)。因此,通过对地下水埋深与土壤盐渍化交互效应研究,结合灌区各种农作物的耐盐阈值,可初步提出维持区域水土环境良性循环的“生态地下水位”,再由田间水利用系数与地下水补给系数之间的关系,推算田间作物理论最适灌溉用水量。研究对维持河套灌区区域水土环

境良性循环具有重要的现实意义，为河套灌区制定合理的地下水控制深度和灌溉制度提供理论依据，对合理利用水资源，改善区域农田生态环境具有非常重要的意义。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 平衡施肥研究

内蒙古河套灌区是我国重要粮食产区，灌溉条件优越，水量充足，是具有悠久历史的典型灌区，该区域多数农田土壤的养分含量不能满足作物高产的需求，必须通过施肥才能保证作物高产，而化肥则是氮、磷、钾的主要来源（黄绍敏等，2006）。近年来，在灌区农业生产过程中，存在施肥结构单一、比例不均等特点，化肥用量呈逐年加大趋势，肥料的利用效率则较低，造成大量肥料损失，直接或间接对地下水环境造成严重危害。FAO 统计数据显示，在农业增产措施中，化肥所起的作用占 30%~50%，利用效率较低，其中氮肥利用率为 30%~35%，磷肥为 10%~20%（张世贤，1989），化肥的合理施用已成为人们普遍关注的焦点之一（石元亮等，2008；张智峰等，2008）。有学者认为，在农业生产过程中，施肥结构单一、过量施肥，从而忽视了土壤和环境养分的利用，导致根层土壤养分供应与作物养分需求在数量、时间、空间上不匹配，未能充分发挥作物的产量潜力以及对土壤养分损失的有效阻控，是造成肥料利用效率较低的主要原因（张福锁等，2008），同时，肥料的不合理施用也对环境造成了严重污染（段亮等，2007；杜连凤等，2009）。因此，合理调整施肥比例，提高肥料利用效率、减少因施肥造成的污染，发展可持续高效农业是当前的重中之重。

1.2.2 施肥对土壤水分的影响

施肥是通过提高植物的渗透调节能力来抑制蒸腾失水，达到提高水分利用率的目标（汪德水，1999）。杜红霞等（2009）对夏玉米研究表明，施氮能显著提高作物的水分利用效率，但当施氮量超过 240kg/hm² 时，增幅不显著，邓西平等（2003）对旱地春小麦的研究也认为，施肥能明显提高旱地作物的水分利用效率。李良皓等（2009）在中国东北黑土区进行了氮、磷、钾不同配比对大豆水分利用效率的影响研究，表明施肥可显著提高水分利用效率，当土壤对磷、钾肥供应充足，水分利用效率随施氮量的增加而增加，当土壤对氮、钾肥供应充足时，其随着施磷量的增加而表现出抛物线形变化。邢倩等（2008）研究了氮、磷、钾营养对冬小麦水分利用的影响，表明缺氮、缺磷对水分利用

效率影响最大,氮磷钾合理配施能有效提高作物对水分的利用,杨文等(2008)在宁夏对旱地春小麦进行的盆栽试验也表明,氮磷配施有效提高了作物的水分利用效率。

1.2.3 施肥对土壤肥料利用效率的影响

郝明德等(2003)对黄土高原小麦研究表明,氮磷配施比单施氮肥平均增产达127.8%,陈磊等(2007)认为肥料配施能够增加植株氮、磷及钾的含量,提高肥料的利用效率。张爱平等(2009)也认为适当配施磷肥,能增加作物对氮肥的消耗,提高氮肥利用效率。可见,氮磷合理配施能够提高作物对养分的利用效率,解决土壤养分的均衡供应问题,充分发挥作物的生产潜能,减轻农业生产过程中对环境造成的污染(李生秀,1999;陈磊等,2007)。

1.2.4 施肥对植株体内氮素吸收、转运的影响

杨荣等(2009)认为春玉米收获后的植株吸氮量随着施氮量的增加而增加,同延安等(2007)在陕西对冬小麦的研究表明,施氮能显著提高植株中氮素累积量,但随着施氮量的增加,在一定范围内,氮素转运效率增加,施氮过多则有降低趋势。霍中洋等(2004)对不同施氮条件下小麦的氮素吸收、转运规律研究表明,随着施氮量的增加,植株营养化氮素转运量、转运效率、转运贡献率与施氮量之间呈现出二次曲线关系,蔡剑等(2009)对江苏省大麦研究也表明花前氮素转运效率及其对籽粒氮的贡献率则均随施氮水平提高呈单峰曲线变化。吕鹏等(2011)对山东夏玉米研究表明,随着施氮量的增加,植株氮素总积累量表现为先增加后降低的趋势,适宜的施氮水平能够提高营养体氮的转运及花后氮素的同化,促进籽粒氮的累积,提高作物产量。可见,肥料的合理配施能够较好地协调花前氮素转运与花后氮素同化之间关系,对作物生育期内的氮素吸收、转运进行合理的分配(吕鹏等,2011)。

1.2.5 施肥与地上部植株临界氮浓度的关系研究

“临界氮浓度”是作物达到最大干物质时所需要的最低氮浓度,即作物获得最大生物量时所需要的最少氮素含量(Lemaire, 1989; Ulrich, 1992)。Greenwood等(1990)研究表明,作物临界氮浓度与植株地上部干物质之间满足 $N_c = aW^{-b}$ 的幂函数关系,当作物生长不受氮限制时, C_3 、 C_4 作物的临界氮浓度与植株地上部干物质的通用模型表示为: (C_3 : $N = 5.7W^{-0.5}$, C_4 : $N = 4.1W^{-0.5}$); Lemaire等(1990)随后对其进行了改进,提出了(C_3 : $N = 4.8W^{-0.34}$, C_4 : $N = 3.6W^{-0.34}$)。

Justes等(1994)建立了冬小麦的临界氮稀释曲线($N_c = 5.35W^{-0.442}$),

Plenet 和 Lemaire (2000) 建立了玉米临界氮稀释曲线 ($N_c = 34.0W^{-0.37}$), Herrmann 和 Taube (2004) 也建立了玉米临界氮稀释曲线 ($N_c = 34.12W^{-0.391}$), Noura 等 (2010) 研究了加拿大地区春小麦临界氮浓度稀释曲线模型 ($N_c = 38.5W^{-0.57}$), Yue 等 (2012) 建立了华北平原地区冬小麦临界氮浓度稀释曲线模型 ($N_c = 4.15W^{-0.38}$), 赵犇等 (2013) 对两种品种的小麦构建了地上部干物质的临界氮浓度稀释曲线模型 (扬麦 16— $N_c = 4.65W^{-0.44}$, 宁麦 13— $N_c = 4.33W^{-0.45}$), 梁效贵等 (2013) 建立了华北地区定玉米的临界氮稀释曲线 ($N_c = 34.914W^{-0.4134}$)。可见, 由于试验区域的差异, 临界氮稀释曲线可能存在一定的差异 (Justes 等, 1994; Bélanger 等, 2001), 因此, 在内蒙古河套灌区建立盐渍化地区的小麦、玉米临界氮浓度稀释曲线是十分必要的。

1.2.6 农田生态系统氮素循环研究

农田生态系统中, 氮肥是作物生长发育过程中需要量最大的营养元素, 是获得作物高产的重要保证之一, Olsen 指出“与其他养分相比, 氮素需要更多地受到注意, 而且任何措施也不会比它的明智管理带来更大的收益”, 因此, 为了提高作物产量, 在生产上大量增施化肥现象十分普遍。研究表明, 我国主要作物氮肥当季利用率仅为 30%~35%, 远远低于国外氮肥的平均利用率 50%~60% (Bloom, 1998), 而损失率高达 45%~50% (朱兆良, 1992)。一方面氮肥的合理施用会提高作物的产量和品质, 另一方面氮素可通过淋洗、径流、氨挥发、反硝化等过程造成损失, 降低氮素利用率, 造成经济效益下降及生态环境恶化 (张维理, 1995; 吕殿青, 1998; 朱兆良, 2000)。氮素循环的强度取决于作物生产过程中氮素的投入和产出, 施氮肥越多, 氮素循环强度则越大, 反硝化量也越大 (邹国元, 2001)。大水大肥易导致包括氮素气体和硝酸盐淋洗在内的土壤氮素损失增强, 对环境造成严重危害, 因此, 在内蒙古河套地区, 基于土壤氮素平衡理论, 调控农业生产过程中的水肥施用量, 利用田间定位通量法及氮素模型模拟不同氮磷配施模式下农田氮素的转化运移过程, 对促进农业清洁生产具有重要的意义。

1.2.7 农田生态系统氮素淋溶损失研究

农田生态系统中氮输出的主要途径为淋洗损失和流失, 氨挥发以及农作物的输出和硝化反硝化作用氮的损失等, 其中最主要的是氮素淋溶损失。氮素淋溶损失是指土壤中的氮素随水向下移动至根系活动层以下, 不能被作物根系吸收所造成的氮素损失, 它是一种累进过程淋失的氮, 主要包括来源于土体中残留的肥料氮以及当季施入的肥料氮 (朱兆良, 2000)。

1.2.7.1 灌水与氮素淋溶损失的关系研究

造成农田生态系统中氮素淋溶损失的主要有灌溉、施肥、土壤特性等因素。由于硝态氮不能被土壤胶体和黏土矿物吸附,在土壤硝酸盐含量较高和水分运移较好的条件下极容易发生淋溶损失(张玉良,1991),灌溉及降水易把硝态氮淋洗出根区,使其向土壤深层运动(樊军,2003),灌溉造成的土壤氮素淋溶损失占当季施氮量的25%~50%,灌水越多淋失量越大,硝态氮淋失峰在剖面分布上,越向下损失越多,硝态氮淋溶损失与土壤湿度有良好相关关系(郭大应,2001)。因此,在不影响作物产量的前提下,适量削减农田灌溉水量,能够有效降低氮素的淋溶损失及其对地下水环境造成的威胁。

1.2.7.2 施肥与氮素淋溶损失的关系研究

在农业生产过程中,为了提高作物产量而施用了大量氮肥,随着施氮量的增加,氮素的利用率逐渐下降,并且作物不能完全利用肥料中的氮素,其残留则以硝态氮的形式留存于土壤中,部分淋溶至地下水,或在土壤深层累积造成肥料浪费。有研究表明,氮肥用量决定着氮素淋失量的大小(李世清,2000),过量施用氮肥使硝态氮在土壤中大量累积并向下层快速移动(杨莉琳,2003),施肥量小于100kgN/hm²,硝态氮的淋失较缓和,施肥量在100~200kgN/hm²,淋失量随施肥量的增加而增加(Bergstrnol,1986)。同时,袁新民等(2001)研究也表明,施氮对0~2m土层中硝态氮累积有较大影响,随施氮量增加而增加,施氮过量能造成土壤硝态氮大量累积。Douetal等(1995)研究表明,作物收获后土壤硝态氮的残留越多,土壤硝态氮从土壤中被淋失的可能性也越大,对地下水污染的危险性也就越大。但是,如果合理配施氮、磷肥可以大幅减少硝态氮的累积,适量磷、钾肥与氮肥配合施用能协调土壤养分供应,增加作物对土壤硝态氮的吸收,提高作物对肥料的利用率,减少作物收获后土体中硝态氮残留量。

1.2.8 施肥与土壤酶活性的关系研究

在整个土壤生态系统中,土壤酶催化土壤中的生化反应,直接参与植物对营养元素的吸收利用,并在物质循环及能量转化过程中起着重要作用,接近90%的土壤酶是通过植物根系分泌物提供的(Gramss,1999),土壤酶是土壤微生物活性的敏感指示物(侯彦林,2004),可以调控植物生长所需营养元素的转换和循环,是土壤生态系统代谢的重要动力(曹慧,2003),可以评价土壤质量及土壤生态系统的健康状况(Balota,2004)。土壤酶活性高低反映了当地土壤肥力水平,土壤酶活性又与土壤类型、理化性质等密切相关,是表征土壤肥力及土壤生产力的重要指标之一(周礼恺,1987;Insam,1991;Do-

ran, 1994), 可以作为监测施肥过量的指标 (和文祥, 1997)。不同的施肥模式是通过改善土壤养分含量、微生物区系和水热状况来影响土壤酶活性 (Kandeler, 1999), 而土壤酶与作物根系之间具有较好的相关性, 作物根系的生长又和土壤养分含量有着密切关系, 土壤酶能够较好地表述不同施肥模式下土壤养分丰缺情况。

不同的土壤酶从不同的角度反映出当地土壤的肥力状况, 土壤脲酶能够提高土壤中的有机氮转化效率 (宋日, 2002), 为作物的生长提供更多的氮素, 有利于提高作物对土壤氮素的吸收利用效率 (肖慈英, 2002)。土壤脲酶是唯一对尿素在土壤中的转化存在重大影响的酶 (王冬梅, 2006), 土壤脲酶活性与土壤供氮能力关系密切。

土壤蔗糖酶的活性与土壤有效磷含量显著正相关 (王平, 2009), 较高的土壤蔗糖酶活性能够为土壤生物体提供充足的能源, 对作物吸收土壤养分有促进作用; 土壤中氮素含量过大能够抑制土壤蔗糖酶的活性 (夏雪, 2010), 施氮与土壤蔗糖酶活性呈负相关。在不同施肥制度下, 氮磷钾、氮磷配施处理的土壤蔗糖酶活性均显著高于单施无机氮肥处理, 且增施磷肥能够有效地提高土壤蔗糖酶的活性 (孙瑞莲, 2008), 土壤蔗糖酶也是评价土壤肥力水平重要的指标之一。

土壤磷酸酶来自植物根系与土壤微生物的分泌, 有利于提高作物对土壤磷素的吸收利用效率, 是测定土壤磷素肥力的指标 (Benjamin, 2002)。Dodor 等 (2003) 认为, 施用无机氮肥可以显著提高土壤酸性磷酸酶的活性, 氮、磷肥的混合施用也能提高土壤酸性磷酸酶活性。因此, 通过对土壤磷酸酶活性的研究, 能够较好地表征土壤磷素生产力及氮磷肥配施的交互作用。

土壤过氧化氢酶存在于植物体和土壤中, 它是由生物呼吸过程和有机物的生物化学氧化反应产生的, 可以表示土壤氧化过程的强度, 与植物根系的代谢过程密切相关 (关松荫, 1986; 周礼凯, 1987)。

1.2.9 生态地下水位 (埋深) 概念及研究进展

生态地下水位的概念多针对干旱地区植被而提出, 这些地区年降雨量少, 天然降雨无法满足地区生态系统中植被的生存和生长, 就需要地下水的补给来维持。维持区域天然植被正常生长所需水分的浅层地下水埋深称为生态地下水埋深 (樊自立等, 2008)。影响植物生长的土壤盐分和水分又与地下水埋深紧密相关, 埋深过浅, 蒸发会使盐分在土壤表层聚集, 导致土壤盐渍化; 埋深过深, 水分无法正常被植物利用吸收, 导致土壤荒漠化, 因此将能控制蒸发返盐, 又能维持植物正常生长的地下水埋深称为适宜生态地下水埋深 (李和平等, 2008; 宋郁东等, 2000)。

Gibert 最早将生态学与地下水联系在一起,被认为是地下水生态学的开始,认为植被生长主要靠地下水补给 (Gibert, 1991)。J. C. Stromberg 等 (1996) 在美国建立了干旱区植被特征与地下水位回归方程,用预测地下水位变化来表征植被变化, Lamontagne 等 (2005) 的研究阐述了地下水对植被生长的作用关系, O'Grady 等 (2006)、Baird 等 (2005) 研究了地下水埋深与植被优势群落生长及群落生长与地下水利用间的关系, Gries 等 (2003)、Broksma 等 (2010) 研究表明地下水埋深在一定深度范围内,通过促进植物根系发育使作物良好生长,过浅或过深都会导致根系缺水或缺氧情况发生。研究也发现,地下水埋深超过一定深度后,随着埋深加大,植被及作物生长速度将趋于缓慢 (Mahoney 等, 1992; Robbins 等, 2000)。Horton 等 (2001) 研究表明干旱区植物根系发育与地下水埋深紧密相关,埋深超过 3m 后,根系会逐渐枯死。

国内学者已根据各流域自然条件,给出各自关于生态地下水位的概念。樊自立通过研究塔里木河流域地下水埋深与生态环境关系,指出适宜生态水位即不易发生强烈盐渍化和荒漠化的水位 (樊自立等, 2004)。生态地下水位的定义为维持植物群落正常稳定生长又不使其生长环境被其他植被影响的某一范围的地下水埋深成为生态地下水位,是能够满足生态植被需水要求、不至于使生态环境恶化的地下水位 (张长春等, 2003; 孙才志等, 2007)。

目前生态地下水位的确定方法主要是依据不同地下水埋深条件下植物种群出现频率及生长状况进行综合判断 (李和平等, 2008)。地下水埋深是干旱区影响作物蒸腾蒸发量的主要因素,影响着区域植被生长及作物产量,银川干旱地区在雨季维持区域生态植被正常生长的生态埋深为 4m (X. M. Jin 等, 2014)。

王芳等 (2002) 应用不同数值方法得出了塔里木盆地适宜不同植物群落生长的生态地下水位,张丽等 (2004) 建立了黑河流域植被生长与地下水关系模型,研究了不同植被生长状况对地下水埋深的响应关系,任杰等 (2010) 利用 SWAP 模型研究了植被生长性状与地下水埋深关系,马龙等 (2007) 研究了科尔沁沙地植被生长与地下水埋深、土壤含水量的相关关系,杨自辉等 (2000) 的研究指出民勤绿洲边缘地下水位下降导致植物中区退化,优势种群白刺在地下水埋深 7.45~11.65m 范围内扩展,朱军涛等 (2011) 应用多种分析方法得出了额济纳荒漠绿洲主要植物群落类型,并指出地下水埋深变化是制约该地区群落类型、植物分布的主要因素,郝兴明等 (2007) 应用多种指数对新疆塔里木河下游物种多样性与地下水埋深关系进行研究,指出地下水埋深 6m 为该区物种多样性的临界水位。吴明辉等 (2010) 通过研究减排林地植被盖度与地下水埋深关系,得出合理生态地下水位为 2.5~5m,任志国等

(2014) 通过研究塔里木河下游不同地下水埋深梯度与植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 、光合作用、叶绿素荧光等响应关系,从机理上解释了生态植物种群适应干旱环境的策略。

以上研究都表明:地下水位(埋深)与生态环境紧密相关,研究生态地下水位(埋深)即研究与生态环境有关的地下水位(埋深)阈值。目前生态地下水位的确定主要根据区域植被生长对不同地下水埋深的响应关系来综合判定,研究多为流域或沙漠地区地表植被正常生长所需的适当地下水位,为农田环境保护策略提出而进行的维持区域水土环境良性循环,适宜农作物生长的生态地下水位(埋深)研究较少,这对于生态地下水位的研究既是一个新的难题,又是一个新的挑战。

1.2.10 地下水临界深度研究

土壤发生盐渍化的首要条件是地下水位埋深浅,因此,控制地下水埋深是防止土壤盐化的有效措施,要控制地下水埋深,必须拟定控制指标,这个指标通常称为地下水“临界深度”(袁长极,1964)。有的学者定义为“在一定农作措施下,保证土壤不积盐且能让作物正常生长的最小地下水埋深”(郭元裕,1997)。而后李云峰提出地下水临界深度与极限蒸发深度、适宜农作物生长的合理埋深概念有差别,临界深度是土壤改良学范畴;极限蒸发深度是水文地质学常用概念;合理深度是作物种植学范畴(李云峰,1988)。王水献等(2011)在焉耆盆地较全面地研究讨论了合理地下水生态埋深应考虑的因素,即地下水埋深与植被生长、潜水蒸发、区域土壤盐渍化等的关系,适宜的地下水埋深能够保证区域水土良性循环,明显增加作物产量(郭枫等,2008)。

通过以上参考,本文明确了所研究概念应为河套灌区适宜作物生长的合理地下水埋深。同时,非作物生长期的土壤积盐会严重影响作物生长期作物生长,因此,非作物生长期的地下水埋深也要严格控制(郭占荣等,2002)。

在适宜作物生长地下水埋深方面,众多学者也进行了多年试验研究。在地下水浅埋区,地下水影响作物水分利用效率及产量机理在于其影响作物根系活动,影响作物的根冠关系和冠层的光合作用,进而影响作物生长规律(王晓红等,2006)。所以众多学者确定适宜埋深的主要思路为:试验设定不同地下水埋深处理,通过分析不同处理对作物生长状况、产量构成等影响,二者均最优(尤其产量最优)情况对应的地下水埋深即为适宜作物生长的地下水埋深。

国外学者研究了地下水埋深对作物生长影响及其与土壤盐渍化的关系,说明干旱区地下水埋深是制约地区发展的主要威胁(Jonathan等,2001; Ri, 2000)。R. Talebnejad等(2015)的研究表明,在非盐渍化地区,地下水埋深