



**土肥水资源高效种植制度
优化与机理研究**



逢焕成 李玉义 著

中国农业科学技术出版社



**土肥水资源高效种植制度
优化与机理研究**



逢焕成 李玉义 著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

土肥水资源高效种植制度优化与机理研究 / 逢焕成,
李玉义著. — 北京: 中国农业科学技术出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-5116-2886-2

I. ①土… II. ①逢… III. ②李… III. ①土壤管理—研究
②肥水管理—研究 IV. ①S156②S365

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第295044号

责任编辑 贺可香
责任校对 李向荣

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街12号 邮编: 100081
电 话 (010) 82106638 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)
传 真 (010) 82106650
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 各地新华书店
印 刷 北京科信印刷有限公司
开 本 710 mm × 1 000 mm 1/16
印 张 19.5
字 数 350千字
版 次 2017年4月第1版 2017年4月第1次印刷
定 价 98.00元

— 版权所有 · 翻印必究 —

《土肥水资源高效种植制度优化与机理研究》

著者名单

主 著 逢焕成 李玉义

副主著 王 婧 于天一 董建新 丛 萍

著 者 (按姓氏笔画排序)

于天一 王伯仁 王 婧 丛 萍 卢 闯 刘 明

刘高洁 张 莉 张宏媛 李玉义 杨 波 赵长海

逢 博 逢焕成 董建新 董鲁浩 蒋其鳌 翟 振

前 言

土、肥、水是“农业八字宪法”的前三位要素，说明其在农业生产中的重要性。我国地域广阔，土壤类型多样，不同土壤对水肥的利用状况必然有一定的差异。因此，深入研究我国不同土壤条件下的水肥互作效应，并探明其机制，不仅可以提高水肥利用效率，而且还可以为从宏观上把握水肥投入的区域性差异提供决策依据。

依托于国家973项目、948项目、公益性行业（农业）科研专项、中央级公益性科研院所专项基金等项目的支持，研究团队于2003—2011年，以小麦、玉米为研究作物，运用室内盆栽和大田长期定位相结合方法，对三类土壤进行了土、肥、水互作试验比较研究，探明不同区域土、肥、水交互效应的异同点，并结合研究小麦、玉米在不同生育阶段的光合指标和主要衰老生理指标的变化规律，揭示不同区域土、肥、水交互效应的生理机制，为实现小麦—玉米种植制度下的高产稳产和土肥水资源高效利用的协调发展提供科学指导。

全书共13章，各章主要撰写人员如下：

- 第一章 逢焕成 李玉义
- 第二章 逢焕成 李玉义 丛 萍 王 婧 董建新
- 第三章 刘 明 李玉义 逢焕成 丛 萍 逢 博
- 第四章 赵长海 逢焕成 李玉义 逢 博 丛 萍
- 第五章 刘 明 逢焕成 李玉义 王 婧 董建新
- 第六章 赵长海 逢焕成 李玉义 翟 振 卢 闯
- 第七章 逢焕成 李玉义 刘 明 丛 萍 张 莉 张宏媛
- 第八章 逢焕成 李玉义 赵长海 丛 萍 逢 博 张 莉
- 第九章 李玉义 逢焕成 董建新 刘 明 赵长海 张 莉
- 第十章 刘高洁 逢焕成 李玉义 王 婧 逢 博 翟 振 蒋其鳌
- 第十一章 于天一 董鲁浩 逢焕成 李玉义 王 婧 杨 波
- 第十二章 于天一 董鲁浩 逢焕成 李玉义 王 婧 王伯仁
- 第十三章 李玉义 逢焕成 于天一 刘高洁 董鲁浩 王 婧

全书由逢焕成、李玉义统稿并审核定稿。

由于著者水平有限，不妥之处，敬请批评指正。

著 者

目 录

第一章 研究背景	1
第一节 研究背景与意义	1
一、研究背景	1
二、研究意义	3
第二节 国内外研究进展	5
一、作物生产中的水肥关系机制	5
二、国内外肥料长期定位试验研究情况	10
参考文献	13
第二章 研究内容与方法	19
第一节 研究目标	19
第二节 研究内容	19
一、三种土壤类型下小麦玉米水肥交互效应盆栽试验研究	19
二、不同土壤类型下长期定位施肥对小麦玉米生长及生理生化特性的影响	20
第三节 技术路线	21
第四节 试验方案与测定指标	21
一、室内盆栽试验研究	21
二、长期定位试验研究	25
参考文献	31
第三章 潮土下小麦水氮磷钾互作效应	32
第一节 水氮磷钾互作对小麦生长发育的影响	32
一、水氮磷钾互作对小麦株高的影响	33
二、水氮磷钾互作对小麦叶面积的影响	34
第二节 水氮磷钾互作对小麦光合指标的影响	36
一、水氮磷钾互作对小麦净光合速率的影响	37
二、水氮磷钾互作对叶片蒸腾速率和气孔导度的影响	40

第三节 水氮磷钾互作对小麦叶片保护酶和丙二醛含量的影响	44
一、水氮磷钾互作对小麦叶片SOD的影响	44
二、水氮磷钾互作对小麦叶片POD的影响	45
三、水氮磷钾互作对小麦叶片CAT的影响	46
四、水氮磷钾互作对小麦叶片MDA的影响	46
第四节 水氮磷钾互作对小麦生物产量的影响	47
一、 W_1 条件下氮磷钾互作对小麦生物产量的影响	49
二、 W_2 条件下氮磷钾互作对小麦生物产量的影响	50
第五节 水氮磷钾互作对小麦经济产量的影响	52
第六节 水氮磷钾互作对小麦氮磷钾吸收状况的影响	56
第七节 本章小结	57
参考文献	58
第四章 潮土下玉米水氮磷钾互作效应	60
第一节 水氮磷钾互作对玉米生长发育的影响	60
一、水氮磷钾互作对玉米株高的影响	60
二、水氮磷钾互作对玉米叶面积的影响	61
第二节 水氮磷钾互作对玉米干物质积累的影响	62
一、水氮磷钾互作对5叶期玉米干物质积累的影响	62
二、水氮磷钾互作对8叶期玉米干物质积累的影响	64
三、水氮磷钾互作对12叶期玉米干物质积累的影响	65
四、水氮磷钾互作对15叶期玉米干物质积累的影响	67
五、水氮磷钾互作对18叶期玉米干物质积累的影响	68
六、不同叶龄期水氮磷钾单因子影响综合比较	69
七、不同叶龄期水氮磷钾双因子影响综合比较	69
第三节 水氮磷钾互作对玉米养分吸收的影响	70
第四节 水氮磷钾互作对玉米光合生理的影响	71
一、8叶期玉米光合生理	71
二、15叶期玉米光合生理	73
第五节 水氮磷钾互作对叶片保护系统的影响	76
一、水氮磷钾互作对8叶期玉米叶片保护系统的影响	76
二、水氮磷钾互作对15叶期玉米叶片保护系统的影响	78
第六节 本章小结	81
参考文献	82

第五章 黑垆土下小麦水氮磷钾互作效应	83
第一节 水氮磷钾互作对小麦生长发育的影响	83
一、水氮磷钾互作对小麦株高与叶面积的影响	83
二、水氮磷钾互作对小麦光合指标的影响	87
第二节 水氮磷钾互作对小麦叶片保护酶和丙二醛含量的影响	94
一、水氮磷钾互作对叶片保护酶的影响	94
二、水氮磷钾互作对小麦叶片MDA含量的影响	96
第三节 水氮磷钾互作对小麦生物产量的影响	97
一、水氮磷钾互作对W ₁ 条件下小麦生物产量的影响	99
二、水氮磷钾互作对W ₂ 条件下小麦生物产量的影响	100
第四节 水氮磷钾互作对小麦经济产量的影响	102
第五节 水氮磷钾互作对小麦氮磷钾吸收状况的影响	105
第六节 本章小结	106
参考文献	107
第六章 黑垆土下玉米水氮磷钾互作效应	109
第一节 水氮磷钾互作对玉米生长发育的影响	109
一、水氮磷钾互作对玉米株高的影响	109
二、水氮磷钾互作对玉米叶面积的影响	111
第二节 水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米干物质积累的影响	112
一、水氮磷钾互作对5叶期玉米干物质积累的影响	112
二、水氮磷钾互作对8叶期玉米干物质积累的影响	113
三、水氮磷钾互作对12叶期玉米干物质积累的影响	115
四、水氮磷钾互作对15叶期玉米干物质积累的影响	115
五、水氮磷钾互作对18叶期玉米干物质积累的影响	117
六、不同叶龄期水氮磷钾单因子影响综合比较	118
七、不同叶龄期水氮磷钾双因子影响综合比较	118
第三节 水氮磷钾互作对玉米养分吸收的影响	119
第四节 水氮磷钾互作对玉米光合生理的影响	119
一、水氮磷钾互作对8叶期玉米光合生理的影响	120
二、水氮磷钾互作对15叶期玉米光合生理的影响	122
第五节 水氮磷钾互作对玉米叶片保护系统的影响	124
一、水氮磷钾互作对8叶期玉米叶片保护酶和丙二醛含量的影响 ..	125
二、水氮磷钾互作对15叶期玉米叶片保护酶和丙二醛含量的影响	127

第六节 本章小结	129
一、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米株高与叶面积的影响	129
二、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米干物质积累的影响	130
三、水肥互作对玉米养分吸收的影响	130
四、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米光合生理的影响	130
五、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米叶片保护系统的影响	130
参考文献	131
第七章 红壤下小麦水氮磷钾互作效应	133
第一节 水氮磷钾互作对小麦生长发育的影响	133
第二节 水氮磷钾互作对小麦光合指标的影响	136
一、水氮磷钾互作对小麦叶片净光合速率的影响	137
二、水氮磷钾互作对叶片蒸腾速率和气孔导度的影响	141
第三节 水氮磷钾互作对小麦叶片保护酶和丙二醛含量的影响	144
一、水氮磷钾互作对叶片保护酶的影响	144
二、水氮磷钾互作对小麦叶片丙二醛含量的影响	146
第四节 水氮磷钾互作对小麦生物产量的影响	147
一、 W_1 条件下氮磷钾配施对小麦生物产量的影响	149
二、 W_2 条件下氮磷钾配施对小麦生物产量的影响	150
第五节 水氮磷钾互作对小麦经济产量的影响	152
第六节 水氮磷钾互作对小麦氮磷钾吸收状况的影响	154
第七节 本章小结	155
参考文献	156
第八章 红壤下玉米水氮磷钾互作效应	158
第一节 水氮磷钾互作对玉米生长发育的影响	158
一、水氮磷钾互作对玉米株高的影响	158
二、水氮磷钾互作对玉米叶面积的影响	159
第二节 水氮磷钾互作对玉米干物质积累的影响	160
一、水氮磷钾互作对5叶期玉米干物质积累的影响	160
二、水氮磷钾互作对8叶期玉米干物质积累的影响	162
三、水氮磷钾互作对12叶期玉米干物质积累的影响	163
四、水氮磷钾互作对15叶期玉米干物质积累的影响	163
五、水氮磷钾互作对18叶期玉米干物质积累的影响	164
六、不同叶龄期水、氮、磷、钾单因子影响综合比较	165
七、不同叶龄期水、氮、磷、钾双因子影响综合比较	165

第三节 水氮磷钾互作对玉米养分吸收的影响	166
第四节 水氮磷钾互作对玉米光合生理的影响	167
一、8叶期玉米光合生理分析	167
二、15叶期玉米光合生理分析	169
第五节 水氮磷钾互作对玉米叶片保护系统的影响	171
一、红壤下8叶期玉米叶片保护和丙二醛含量分析	172
二、红壤下15叶期玉米叶片保护和丙二醛含量分析	174
第六节 本章小结	176
一、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米株高与叶面积的影响	176
二、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米干物质积累的影响	177
三、水氮磷钾互作对玉米养分吸收的影响	177
四、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米光合生理的影响	177
五、水氮磷钾互作对不同叶龄期玉米叶片保护系统的影响	177
参考文献	178
第九章 三种土壤类型水氮磷钾互作效应比较	180
第一节 三种土壤类型小麦水氮磷钾互作效应比较	180
一、水、氮、磷、钾单因子影响序列比较分析	180
二、水、氮、磷、钾因子交互影响的比较分析	183
第二节 三种土壤类型玉米水氮磷钾互作效应比较	191
一、水、氮、磷、钾互作对玉米生长发育的影响比较分析	191
二、水、氮、磷、钾互作对不同叶龄期玉米干物质积累的影响 比较分析	193
三、水、氮、磷、钾互作对玉米养分吸收的影响比较分析	195
四、水、氮、磷、钾互作对玉米光合生理的影响比较分析	196
五、水、氮、磷、钾互作对玉米叶片保护系统的影响比较分析	196
第三节 本章小结	197
一、三种土壤类型小麦水氮磷钾交互效应比较	197
二、三种土壤类型玉米水氮磷钾交互效应比较	198
参考文献	199
第十章 河南封丘潮土长期不同施肥对冬小麦与夏玉米的物质生产及生理 特性的影响	201
第一节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米生长发育的影响	201
一、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米株高的影响	201
二、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶面积指数的影响	202

三、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米干物质积累的影响·····	204
第二节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片光合生理特性的影响	205
一、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片叶绿素含量的影响	205
二、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片光合速率的影响·····	207
三、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片气孔导度的影响·····	208
四、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片胞间CO ₂ 浓度的影响 ·····	209
五、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片蒸腾速率的影响·····	211
第三节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片保护酶系统的影响 ·····	212
一、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片POD活性的影响 ···	212
二、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片CAT活性的影响·····	214
三、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片SOD活性的影响 ···	215
四、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片MDA含量的影响 ···	216
五、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片可溶性蛋白含量的 影响·····	217
第四节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米产量及产量构成因素 的影响·····	219
一、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米产量性状的影响·····	219
二、长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米周年产量的影响·····	220
三、产量构成因素与冬小麦、夏玉米产量的通径分析·····	221
第五节 本章小结 ······	222
参考文献·····	223
第十一章 北京昌平褐潮土长期不同施肥对冬小麦与夏玉米的物质生产以及 生理特性的影响·····	224
第一节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米生长发育的影响 ······	224
一、长期不同施肥处理对冬小麦生长发育的影响·····	224
二、长期不同施肥处理对夏玉米生长状况的影响·····	226
第二节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米光合生理特性的影响 ······	228
一、长期不同施肥处理对冬小麦光合生理特性的影响·····	228
二、长期不同施肥处理对夏玉米光合生理特性的影响·····	234
第三节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片保护酶系统的影响 ···	239
一、长期不同施肥处理对冬小麦叶片保护酶系统的影响·····	239
二、长期不同施肥处理对夏玉米叶片保护酶系统的影响·····	241

第四节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米产量及产量构成因素的影响·····	244
一、长期不同施肥处理对冬小麦产量及产量构成因素的影响·····	244
二、长期不同施肥处理对夏玉米产量及产量构成因素的影响·····	246
第五节 土壤养分、保护酶、产量构成因素与作物产量的通径分析·····	247
一、土壤养分、保护酶、产量构成因素与冬小麦产量的通径分析·····	247
二、夏玉米产量与产量构成因素的通径分析·····	248
第六节 本章小结·····	249
一、长期不同施肥处理对冬小麦物质生产及生理特性的影响·····	249
二、长期不同施肥处理对夏玉米物质生产及生理特性的影响·····	250
参考文献·····	251
第十二章 湖南祁阳红壤长期不同施肥对冬小麦与夏玉米的物质生产及生理特性的影响·····	252
第一节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米生长发育的影响·····	252
一、长期不同施肥处理对冬小麦生长发育的影响·····	252
二、长期不同施肥处理对夏玉米生长状况的影响·····	254
第二节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片光合生理特性的影响·····	256
一、长期不同施肥处理对冬小麦光合特性的影响·····	256
二、长期不同施肥处理对夏玉米光合特性的影响·····	262
第三节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米叶片保护酶系统的影响·····	266
一、长期不同施肥处理对冬小麦叶片保护酶系统的影响·····	266
二、长期不同施肥处理对夏玉米叶片保护酶系统的影响·····	269
第四节 长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米产量及产量构成因素的影响·····	271
一、长期不同施肥处理对冬小麦产量及产量构成因素的影响·····	271
二、长期不同施肥处理对夏玉米产量及产量构成因素的影响·····	274
第五节 土壤养分、保护酶、产量构成因素与作物产量的通径分析·····	275
一、土壤养分、保护酶、产量构成因素与冬小麦产量的通径分析·····	275
二、夏玉米产量与产量构成因素的通径分析·····	277
第六节 本章小结·····	277
一、红壤长期不同施肥处理对冬小麦生长及生理特性的影响·····	277
二、红壤长期不同施肥处理对夏玉米生长及生理特性的影响·····	278
参考文献·····	279

第十三章	三种土壤类型长期不同施肥对冬小麦与夏玉米水肥利用效率影响 差异比较·····	280
第一节	三种土壤长期不同施肥处理对冬小麦、夏玉米产量影响 差异比较·····	280
	一、长期不同施肥处理对小麦产量及产量构成的影响比较·····	280
	二、长期不同施肥处理对玉米产量及产量构成因素的影响比较·····	283
	三、长期不同施肥处理对小麦玉米周年产量的影响比较·····	286
第二节	三种土壤长期不同施肥处理对水分利用的影响差异比较·····	287
	一、长期不同施肥处理对冬小麦水分利用效率的影响差异·····	287
	二、长期不同施肥处理对玉米水分利用效率的影响差异·····	289
	三、长期不同施肥处理对小麦玉米周年水分利用效率的影响差异 ·····	290
第三节	三种土壤长期不同施肥处理对土壤养分利用的影响差异比较 ·····	291
	一、长期不同施肥处理对土壤养分的影响差异·····	291
	二、土壤养分与小麦、玉米产量的通径分析·····	293
第四节	本章小结·····	294
	参考文献·····	295

第一章 研究背景

我国疆域广阔、人口众多，但耕地面积很少，目前我国以20.25亿亩的耕地面积，人均近225kg的粮食产量养活了14亿多人口（穆怀中，张文晓等，2014），是一个突破，但也面临着挑战。提高粮食产量以应对全面建设小康社会（2020年）以及人口高峰期（2030—2040年），最根本在于耕地质量上（封志明，2007），而以肥养地、以水促肥是提高土地质量、增强土壤肥力的重要手段（温延臣，李燕青等，2015）。本书利用盆栽以及长期定位试验，跨地域选择不同土壤类型进行水肥交互的比较研究，明确不同地域耕地的最合理水肥搭配方法，阐明其作用机制，以为作物种植的灌溉施肥管理提供理论依据，为粮食增产工作打下坚实的理论基础。

第一节 研究背景与意义

一、研究背景

粮食是关系国计民生的重要战略物资，近几年我国粮食连续丰收，供需基本平衡，但随着将来人口的快速增长和耕地的减少，粮食供需有可能出现较大的缺口（封志明等，2007），提高粮食产量仍是目前我国亟待解决的问题。从长远来看，我国耕地面积的增加有限（赵晓丽，张增祥等，2014），只有通过提高粮食单产才能满足这种需求。而作物产量的形成，不仅与作物本身的遗传特性和生理机能等内在因素有关，而且与水、土、肥等外界环境因素密切相关。众多研究表明，在作物增产中，土肥水等条件是关键，而在一定条件下，养分和水分是最容易人为调控的因素（高卫，2015；韩霜，2012）。长期以来，提高农田生产力水平一直是世界各国普遍关注的问题。通过水肥综合措施，改善土壤水分和营养状况，实现水肥交互，达到高产稳产，已成为共识。水肥的正确、合理使用不仅关系到国家的粮食安全、生态

环境改善等宏观问题，而且与千家万户农民的切身利益密切相关。“有收无收在于水，收多收少在于肥”这一传统经验道出了水肥是农业生产基本要素的实质。

据有关专家研究，我国因不合理水肥管理致使水肥利用率低下。水资源紧缺已成为严重制约我国国民经济可持续发展的瓶颈（张依章，刘孟雨等，2007）。农业是我国的用水大户，全年用水总量4 000亿 m^3 ，占全国总用水量的70%，其中农田灌溉用水量3 600亿~3 800亿 m^3 ，占农业用水量的90%~95%，农业用水中的浪费现象相当严重（李保国，黄峰，2010）。首先是农田灌溉水的利用率低，灌溉水的利用率仅30%~40%，而先进发达国家达到70%~80%；其次是农田对自然降水的利用率低，仅56%；最后是农业用水的效率不高，其中农田灌溉水的利用效率仅为1.0 kg/m^3 左右，旱地农田水分利用效率为0.60~0.75 kg/m^3 ，而发达国家为2.0 kg/m^3 ，以色列达到2.35 kg/m^3 （张明生，王丰等，2005）。

化肥作为粮食增产的决定因子在我国农业生产中发挥了举足轻重的作用，但近20多年来，我国化肥用量持续高速增长，粮食产量却始终增加缓慢。张福锁等（2008）总结了近年来在全国粮食主产区进行的1 333个田间试验结果，分析了目前条件下中国主要粮食作物水稻、小麦和玉米氮磷钾肥的偏生产力、农学效率、肥料利用率和生理利用率等，发现小麦和玉米的氮肥农学效率分别为8.0 kg/kg 和9.8 kg/kg ，氮肥利用率分别为28.2%和26.1%，远低于国际水平，与20世纪80年代相比呈下降趋势。造成肥料利用率低的主要原因包括高产农田过量施肥，忽视土壤和环境养分的利用，作物产量潜力未得到充分发挥以及养分损失未能得到有效阻控等（杨青林，桑利民等，2011）。目前，我国化肥的施用量和生产量均居世界首位，在占世界9%的耕地上施用了占世界32%的化肥，单位面积施肥量是世界平均水平的2.6倍，但化肥利用效率比发达国家低10%~20%。当前，我国按可耕地面积计算的施肥水平为266 kg/hm^2 ，远超过世界平均水平的91 kg/hm^2 ，在FAO所统计的162个国家中居第10位。2001—2008年小麦和玉米的单位面积化肥用量分别增加5.4%和29.0%，而水稻减少4.3%，全国粮食作物化肥消费总量增加 $1.3 \times 10^6 t$ ，但占全国化肥消费总量的比重从68%下降到50%（李红莉，张卫峰等，2010）。根据我国化肥网5 000多个田间试验结果表明，我国土壤磷素和钾素营养状况正向两个相反的方向发展：自20世纪70年代中期以来，土壤磷素开始积累有所盈余，土壤中钾素则因每年施用大量氮、磷化肥，产量不断提高，而钾素投入少，产出多，土壤钾肥呈亏缺趋势，目前N、 K_2O 肥配比为1：0.16。此外，我国目前各种微量元素缺乏面积累计达

1.575亿 hm^2 ，其中缺锌面积达4 866万 hm^2 ，缺硼面积3 280万 hm^2 ，缺钼面积4 453.3万 hm^2 。由于所缺养分限制作物对其他养分的吸收，造成了化肥利用率和肥效的下降。从2005年以来，在生产成本增加导致化肥价格上涨的客观条件下，过量施肥、肥料利用率低等因素直接导致每亩土地施肥成本增加十几元。肥料利用率不高，不仅造成了施肥的增产效果和经济效益下降，而且也对生态环境造成了威胁。

在过去的几十年中，人们已经对农田生态系统中的养分、水分循环观测做了大量的研究工作，提出了许多针对性的养分、水分管理措施。随着粮食、资源、环境压力的加大，需要在原有工作的基础上，加强针对不同区域土壤类型的水分、养分供给之间的交互影响研究，以实现作物高产稳产和资源高效利用的协调发展。小麦、玉米是目前我国主要的粮食作物，在我国具有重要的战略意义。我国地域广阔，土壤类型多样，不同土壤对小麦、玉米水肥的利用状况必然有一定的差异。因此，结合长期定位施肥试验和联网观测的方法，从不同时空尺度开展土肥水交互效应研究，并从微观角度揭示其机制，对指导合理施肥、提高作物产量和资源利用效率具有重要研究意义。

二、研究意义

（一）解决13亿人口粮食问题的迫切需要

小麦、玉米是目前世界上主要的粮食作物。2000—2004年世界冬小麦和玉米的年平均产量分别为5.86亿t和6.31亿t（世界粮农组织粮农统计数据库）。小麦是我国最为主要的三大粮食作物之一，在当前我国的口粮消费总量中，小麦占到43%左右，小麦在粮食安全中的地位极为重要。我国小麦生产以冬小麦为主，冬小麦种植面积占全国麦田面积达82%以上，总产量占全国小麦总产量的90%左右。冬小麦因其高产、稳产性好、品质好、营养价值高，是我国北方人民的主要口粮（李军等，2002）。从我国粮食生产的历史来看，玉米一直是我国重要的粮食作物之一。目前，玉米产量在我国粮食作物生产中位居第二。随着畜牧业和玉米深加工工业的发展，玉米已经成为我国最为重要的粮食和饲料作物，在农业生产和国民经济发展中占有越来越重要的地位。1978—2008年，玉米产量由5 594.5万t上升至16 591.4万t，占粮食作物总产量的比重由18.36%上升至31.38%。从播种面积来看，玉米生产虽然有一定的变动，但是，总的趋势是上升的。1979年我国玉米播种面积为2 013.3万 hm^2 ，占粮食作物总播种面积的16.9%，至2008年玉米播种面积扩大到2 986.37万 hm^2 ，占全国粮食播种面积的28%。鉴于小麦、玉米在

我国粮食生产中的重要地位，以其为研究对象开展农业科学试验是非常必要的。

(二) 提高肥料利用率，降低环境污染的迫切需要

目前我国化肥在使用过程中存在着许多问题，首先，化肥利用率普遍偏低，损失严重；化肥当季利用率普遍在30%左右，而发达国家高达50%~60%。我国大田生产中，氮肥的当季利用率在30%~35%，磷肥的当季利用率为10%~25%，钾肥的当季利用率为35%~50%，化肥的损失非常严重，据推算我国从1985—1996年，仅仅氮肥的损失就达1 980亿元（杨青林，桑利民等，2011）。其次，施用化肥所带来的环境污染问题、农产品安全问题，例如水体富营养化，农田N素逸出对大气层特别是臭氧层的影响等。再者，施肥结构不合理，养分使用不平衡问题（朱兆良，金继运，2013），农作物正常生长需要一个合适的养分比例，这主要决定于作物的营养特性、土壤养分的供应能力和所施用肥料的农化性状，忽视任何一个方面，都会引起作物养分失调。因此开展水肥协同效应的研究不仅可以达到增产的目的，而且能提高水肥利用率，节约资源，减少环境污染。

(三) 基于水资源紧缺的背景，改变农业灌溉水利用率低的迫切需要

根据权威部门的预测结果，在不增加现有农田灌溉用水量的情况下，2030年全国缺水高达1 300亿~2 600亿 m^3 ，其中农业缺水500亿~700亿 m^3 （李勇，杨宏志等，2009）。若将农田灌溉水的利用率由目前的45%提高到发达国家70%的水平，则可节水900亿~950亿 m^3 ，如通过施肥等措施同时提高水的利用效率，农业节水后不仅可以满足7亿t左右的食物生产用水，还能节约400亿~500亿 m^3 的水量用于国民经济的其他重要行业，这无疑会对未来的国家经济持续发展和社会安全稳定做出重大贡献。通过合理施肥措施，提高土壤肥力对于改善水分利用效率有很大影响，但一直没有受到足够的重视。因此，研究不同降水区域长期施肥的水肥效应具有重要意义。

(四) 实现科学施肥技术研究取得重大突破的迫切需要

水分、养分供给之间的交互效应不仅有地带性差异，而且具有长期累积性，因此国际上十分重视长期定位试验的联网研究。联网长期定位施肥试验可以对比研究不同降水区域、不同降水年景表现出各施肥处理不同的产量效应，能对水分、养分供给之间的交互影响及其机制等问题进行全面的研究（聂胜委，黄绍敏等，2012），已经成为人们全面了解影响农田生态系统的水肥之间相互作用的重要手段。相对于短期试验，联网长期定位施肥试验具有时间上的长期性，气候上的重复性，检测项目上的定位性等特点，信息量丰富，数据准确可靠，能够解释许多短期试验不能解决的科学问题。我国地