

郑网宇,陈功磊,吴迪,等. 不同肥力水平土壤小麦的氮磷钾肥料效应及养分吸收利用研究——以太湖流域丹阳市为例[J]. 江苏农业科学, 2019,47(23):96-101.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.023

# 不同肥力水平土壤小麦的氮磷钾肥料效应 及养分吸收利用研究 ——以太湖流域丹阳市为例

郑网宇<sup>1</sup>, 陈功磊<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 蒋国龙<sup>2</sup>

(1. 江苏省丹阳市农业农村局土壤肥料保护站, 江苏丹阳 212300;

2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部江苏耕地保育科学观测试验站, 江苏南京 210014)

**摘要:**研究太湖流域江苏省丹阳市主栽小麦品种氮磷钾推荐用量及养分吸收状况,为引导该区域科学施肥提供科学依据。应用改进的“3414”试验方案,设置梯度土壤肥力试验,研究氮磷钾配合施用对小麦产量及养分吸收的影响。施用氮、磷、钾肥料与缺素区相比相对增产效果为氮>钾>磷。三元二次方程拟合结果表明,在本试验条件下,该区域氮、磷、钾肥料最佳经济施用量分别为188.1、65.7、104.0 kg/hm<sup>2</sup>。合理施肥可促进小麦对氮、磷、钾的吸收,小麦对氮肥、磷肥、钾肥的利用率分别为30.2%、43.7%、36.0%。该区域养分推荐用量较好地反映了该区域土壤肥效反应,并可为其他作物的区域施肥提供理论支撑。

**关键词:**土壤肥力;小麦;改进的“3414”试验;产量;推荐施肥量

**中图分类号:** S512.106 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0096-06

化肥施用对保障我国粮食生产起着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。然而,近年来由于不合理施用化肥,导致的肥料利用率低和环境污染(如土壤酸化、地下水硝酸盐含量超标、湖泊富营养化和温室气体排放量增加等)等一系列问题,引起了人们的广泛关注<sup>[2]</sup>。有研究报道,不同地区土壤基本施肥水平差异较大,区域间肥料施用不合理的问题较为突出<sup>[3-4]</sup>。另外,近年来我国肥料产业正快速发展,然而,一些肥料产品在生产时考虑土壤地力和作物吸收需求,导致养分损失和用肥成本增加,但产出较低<sup>[5]</sup>。因此,优化不同区域的肥料施用方案显得至关重要。

小麦是我国主要粮食作物之一,在农业生产中占有主要地位<sup>[6]</sup>。随着生活水平的不断提高,人们对小麦产量和品质的追求越来越高,而肥料施用量是影响小麦产量和品质的重要因素<sup>[7]</sup>。目前针对江苏省丹阳市主栽小麦品种的施肥研究较少。“3414”试验为氮(N)、磷(P)、钾(K)3个因素4个水平14个处理的方案,是农业农村部在测土配方施肥项目实施过程中推荐的用于确定作物最佳氮磷钾施用量及配比的试验设计方案,它具有回归最优设计处理少、效率高、信息量多等优点<sup>[8]</sup>,目前已被广泛地应用于水稻<sup>[9]</sup>、绿豆<sup>[10]</sup>、仙

草<sup>[11]</sup>、红芸豆<sup>[12]</sup>及小麦<sup>[13]</sup>等作物的测土配方施肥中。本研究拟采用改进的“3414”试验设计方法,探索不同肥力状况下农田种植小麦最佳经济产量以及最佳氮磷钾肥施用量等基本参数,旨在减少过量施肥带来的危害,提高经济效益,为江苏省丹阳市乃至苏南麦区测土配方施肥提供科学理论依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 供试地点及基本概况

1.1.1 试验地点 根据前茬作物产量来区分田块高、中、底地力水平,2013—2017年选择丹阳市不同土壤肥力田块进行小麦“3414”试验。其中,2013—2014年和2014—2015年分别选择高、中、低地力田块设计试验,2015—2016年和2016—2017年选择中等地力田块设计试验,试验田块基本信息如表1所示。

1.1.2 供试土壤及品种 供试土壤为黄泥土、粉沙土,是丹阳市小麦种植的2个主要土种(表1)。供试小麦品种为当年主推品种。

### 1.2 试验设计

采用“3414”完全试验方案设计,设氮、磷、钾3个因素4个水平(0、1、2、3)14个处理。(1)0水平指不施肥;(2)2水平指当地推荐施肥水平;(3)1水平=2水平×0.5;(4)3水平=2水平×1.5;(5)1.5水平=2水平×0.75;(6)2.5水平=2水平×1.25。本试验从2014年起氮素施用量增设2个水平,又称3416试验(表2)。

试验小区宽4.0 m,长5.0 m,小区之间开沟(沟宽20 cm)隔离,四周保护行宽2 m以上。试验用氮肥为尿素(含N 46%),氮肥运筹:基肥36%、苗肥24%、拔节孕穗肥40%(分2次施用,倒3叶期施用60%、倒2叶40%);磷肥为

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0200805);江苏省重点研发计划(编号:BE2019378);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(18)3002]。

作者简介:郑网宇(1979—),男,江苏丹阳人,高级农艺师,主要从事土壤肥力质量研究与推广工作。E-mail:458987107@qq.com。

通信作者:蒋国龙,副研究员,主要从事农业经济管理研究。Tel:(025)84390356;E-mail:j.guolong@163.com。

表1 试验地土壤基本理化性状

时间	试验地点	地力水平	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
2013—2014	吕城严家	高	18.1	1.08	5.40	50
	吕城河北	中	16.4	0.92	9.50	38
	吕城井元	低	18.5	1.03	2.60	38
	宝林农场南	高	18.3	1.29	21.5	84
	宝林农场西	中	20.8	1.29	11.7	70
	宝林农场东	中	19.9	1.30	11.4	60
	宝林农场北	低	22.1	1.52	23.5	60
	珥陵(1)	高	22.3	1.51	17.6	58
	珥陵(2)	中	22.2	1.41	6.6	38
珥陵(3)	低	22.6	1.53	9.2	40	
2014—2015	珥陵中仙	高	28.3	1.65	9.3	46
	吕城严家	中	15.8	1.07	3.2	36
	陵口东沟村	低	14.9	1.02	5.7	36
2015—2016	延陵镇	中	14.9	1.08	21.2	110
	陵口镇	中	27.7	1.69	5.3	53
2016—2017	陵口镇	中	15.9	1.14	—	—

表2 “3414(3146)”试验方案处理编码

处理编号	处理编码	水平		
		N	P	K
1	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0	0	0
2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	0	2	2
3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	1	2	2
4	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	2	0	2
5	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	2	1	2
6	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	2	2	2
7	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	2	3	2
8	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	2	2	0
9	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	2	2	1
10	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	2	2	3
11	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	3	2	2
12	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	1	1	2
13	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	1	2	1
14	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	2	1	1
15	N <sub>1.5</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	1.5	2	2
16	N <sub>2.5</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	2.5	2	2

过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、钾肥为氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%),磷、钾肥一次性作基肥施用,各地力等级处理施肥量见表3。在小麦生长期,按照当地的生产标准对其进行管理。

表3 各地力等级2水平施肥量

时间	地力水平	施肥量(kg/hm <sup>2</sup> )		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2013—2014	高	228	90	135
	中	189	75	112.5
	低	159	63	90
2014—2015	高	228	90	135
	中	189	75	112.5
	低	174	63	90
2015—2016	延陵中	189	67.5	112.5
	陵口中	210	90	135
2016—2017	中	195	75	112.5

### 1.3 采样及测定方法

在小麦成熟收获时,各小区单割单收和称质量。小麦茎秆、籽粒的全氮含量用浓硫酸消解,凯氏定氮法测定;全磷含量用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub>消解,钒钼黄比色法测定;全钾含量用火焰光度法测定<sup>[14]</sup>。

### 1.4 数据处理

数据采用Excel 2010、“3414”田间试验设计与数据分析管理系统软件和SPSS 20软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对小麦产量的影响

2.1.1 缺素对产量的影响 从表4、表5可以看出,无N区小麦产量为2.07~3.56 t/hm<sup>2</sup>,平均为2.87 t/hm<sup>2</sup>;其与全肥区(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)的相对产量为39.8%~76.1%,平均为54.8%;其中4个试验地点不施氮时的相对产量低于50%,最低的为2015—2016年农场中东(中等地力),12个试验地点不施氮肥时相对产量大于50%,其中只有1个试验地点的结果大于65%。小麦不施磷肥处理产量为3.29~6.60 t/hm<sup>2</sup>,平均为4.49 t/hm<sup>2</sup>;其与全肥区(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)的相对产量为69.3%~94.8%,平均为85.2%;其中7个试验点不施磷时相对产量低于85%。小麦不施钾肥处理产量从2.99~6.32 t/hm<sup>2</sup>,平均为4.35 t/hm<sup>2</sup>(表4);其与全肥区(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)的相对产量为66.6%~96.1%,平均82.7%(表5);其中10个试验点不施钾时相对产量低于85%。小麦不施肥产量为1.62~3.45 t/hm<sup>2</sup>,平均为2.50 t/hm<sup>2</sup>;其与全肥区(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)的相对产量为33.3%~60.3%,平均为47.5%;其中8个试验地点不施肥时相对产量小于50%,只有1个试验地点相对产量高于60%,最低的为2013—2014年珥陵(高等地力)试验地点。

通过对所有试验地点小麦缺素相对产量进行分析,可以看出,N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>(缺P区)>N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>(缺K区)>N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>(缺N区)>N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>(空白),表明氮素是影响小麦产量的主要因素,其次为钾,再次为磷。

表4 2013—2017年不同处理小麦产量

时间	试验地点	产量(t/hm <sup>2</sup> )												t/hm <sup>2</sup>				
		N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>4</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>6</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>8</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>10</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>12</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>14</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>16</sub> K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> P <sub>18</sub> K <sub>2</sub>					
2013—2014	吕城严家	2.97	3.08	4.53	4.59	4.88	5.18	4.94	4.35	5.00	4.71	3.99	4.44	4.70	—	—	—	—
	吕城河北	2.73	2.84	4.25	4.01	4.67	5.03	4.94	4.20	4.80	4.89	3.92	3.92	4.17	—	—	—	—
	吕城井元	1.92	2.07	3.21	3.51	3.75	3.95	4.07	3.39	3.50	4.49	3.21	2.81	3.35	—	—	—	—
	宝林农场南	2.91	3.00	4.49	6.60	6.71	6.96	7.79	6.32	7.14	4.91	6.87	4.08	4.85	—	—	—	—
	宝林农场西	3.45	3.56	4.53	4.28	4.85	5.96	5.03	4.35	4.71	5.85	3.93	3.98	5.57	—	—	—	—
	宝林农场东	2.10	2.18	4.92	4.64	5.54	5.45	5.04	4.41	5.22	4.55	4.62	4.25	4.74	—	—	—	—
2014—2015	宝林农场北	1.68	3.54	4.32	3.90	4.50	4.65	4.35	4.14	4.61	4.10	4.52	4.91	6.24	—	—	—	—
	珙陵(1)	1.65	2.36	4.29	4.61	4.61	4.95	4.53	3.30	4.25	4.08	3.77	3.98	4.50	—	—	—	—
	珙陵(2)	1.62	2.07	3.44	3.56	3.98	3.90	3.39	2.99	3.39	4.01	2.42	2.99	3.98	—	—	—	—
	珙陵(3)	1.94	2.61	3.33	4.22	4.98	4.83	4.80	4.64	5.16	4.80	3.44	3.90	4.47	—	—	—	—
	珙陵中仙	3.09	3.38	5.25	5.04	5.54	5.94	5.42	4.55	5.18	5.42	4.97	4.86	4.97	5.45	5.45	5.54	5.54
	吕城严家	2.85	3.03	4.59	4.67	5.00	5.61	5.12	4.41	4.98	5.09	4.43	4.62	4.88	4.88	4.88	4.77	4.77
2015—2016	陵口东沟	2.45	2.70	3.56	3.29	4.40	4.74	4.58	3.83	4.47	4.68	3.96	3.92	4.05	4.29	4.50	4.50	4.50
	延陵镇	2.45	2.85	4.56	5.55	5.67	6.00	5.73	5.27	5.54	5.43	5.40	5.37	5.25	5.63	5.57	5.57	5.57
	陵口镇	3.30	3.50	4.22	4.44	4.86	5.48	5.04	4.64	4.88	5.13	4.43	4.37	4.80	5.01	4.97	4.97	4.97
	陵口镇	2.91	3.06	4.82	4.85	4.85	5.49	5.40	4.83	5.10	5.69	4.76	4.70	4.70	5.00	5.19	5.19	5.19
	平均	2.50	2.86	4.27	4.49	4.92	5.26	5.01	4.35	4.87	4.92	4.29	4.19	4.70	5.04	5.04	5.04	5.04

表5 2013—2017年不同处理小麦缺素相对产量

时间	试验地点	相对产量(%)			
		无N区	无P区	无K区	空白区
2013—2014	吕城严家	59.3	88.7	84.0	57.4
	吕城河北	56.4	79.7	83.6	55.3
	吕城井元	52.3	89.0	85.8	48.5
	宝林农场南	43.2	94.8	90.8	41.8
	宝林农场西	59.8	71.8	73.1	58.1
	宝林农场东	39.8	85.1	81.0	38.6
	宝林农场北	76.1	83.9	88.9	36.2
	珙陵(1)	47.5	93.0	66.6	33.3
	珙陵(2)	53.0	91.3	76.5	41.6
2014—2015	珙陵(3)	54.0	87.3	96.1	40.1
	珙陵中仙	56.9	84.8	76.6	52.0
	吕城严家	54.0	83.1	78.5	50.9
2015—2016	陵口东沟村	57.0	69.3	80.7	51.4
	延陵镇	47.4	92.5	87.7	40.7
	陵口镇	63.7	81.0	84.6	60.3
2016—2017	陵口镇	55.8	88.4	87.9	53.0
	平均	54.8	85.2	82.7	47.5

2.1.2 不同施N水平对产量的影响 在满足P、K需求量(2水平)的条件下,小麦产量和施N量呈二次抛物线关系(表6)。2013—2014年进行的是“3414”试验,其中有3个试验地点的小麦产量与氮肥施用量呈显著相关关系。2014—2017年进行增加2个氮肥处理的“3416”试验,除2014—2015年陵口镇东沟村外,其他试验地点的小麦产量与施N量均达到显著或极显著相关水平。从分析结果可以发现,最高产量对应施N量为141.0~313.5 kg/hm<sup>2</sup>,平均为216.8 kg/hm<sup>2</sup>;最佳产量对应施氮量为114.0~274.5 kg/hm<sup>2</sup>,平均为188.1 kg/hm<sup>2</sup>(其中高等217.5、中等192.8、低等136.5 kg/hm<sup>2</sup>)。在满足P、K需求量(2水平)的条件下,施N量为最佳水平时小麦的产量为5.18 t/hm<sup>2</sup>。

2.1.3 不同施磷水平对产量的影响 在满足N、K需求量(2水平)的条件下,小麦产量和施P量呈二次抛物线关系,关系方程见表7。其中有3个试验点小麦产量与施磷量呈显著相关关系,1个试验点呈极显著相关关系。从分析结果可以发现,除去2013—2014年农场南(施磷量最高值低于最佳值)、珙陵(1)高等地力( $R^2$ 太小)试验地点外,最高产量对应施磷量为51~126 kg/hm<sup>2</sup>,平均为76.1 kg/hm<sup>2</sup>;最佳施磷量为43.5~91.5 kg/hm<sup>2</sup>之间,平均为65.7 kg/hm<sup>2</sup>(其中高等71.3、中等67.1、低等58.0 kg/hm<sup>2</sup>)。在满足N、K需求量(2水平)的条件下,施磷量为最佳水平时小麦的产量为5.18 t/hm<sup>2</sup>。

2.1.4 不同施钾水平对产量的影响 在满足N、P需求量(2水平)的条件下,小麦产量和施K量呈二次抛物线关系(表8)。其中有1个试验地点小麦产量与施钾量呈显著相关关系,2个试验地点呈极显著相关关系。从分析结果可以得出,最高产量对应施钾量为67.5~222.0 kg/hm<sup>2</sup>,平均为126.6 kg/hm<sup>2</sup>;最佳施钾量在57.0~187.5 kg/hm<sup>2</sup>之间,平均为104.0 kg/hm<sup>2</sup>(其中高等108.0、中等114.6、低等70.5 kg/hm<sup>2</sup>)。在满足N、P需求量(2水平)的条件下,施K量为最佳水平时小麦的产量为5.32 t/hm<sup>2</sup>。

表6 不同供试地点小麦产量与施氮量回归统计

时间	试验地点	一元二次方程	最高产量对应施氮量 (kg/hm <sup>2</sup> )	最高产量 (t/hm <sup>2</sup> )	最佳施氮量 (kg/hm <sup>2</sup> )	最佳施氮量对应 产量(t/hm <sup>2</sup> )
2013—2014年	吕城严家	$Y = 203.0 + 17.6X - 0.56X^2, r^2 = 0.998^*$	237.0	5.15	196.5	5.09
	吕城河北	$Y = 187.8 + 19.6X - 0.65X^2, r^2 = 0.999^*$	228.0	5.04	192.0	5.00
	宝林农场南	$Y = 186.8 + 24.5X - 0.59X^2, r^2 = 0.918$	313.5	6.65	274.5	6.59
	宝林农场西	$Y = 227.9 + 21.1X - 0.79X^2, r^2 = 0.868$	199.5	5.54	171.0	5.49
	宝林农场东	$Y = 148.3 + 35.4X - 1.39X^2, r^2 = 0.990$	192.0	5.61	175.5	5.60
	宝林农场北	$Y = 234.3 + 15.4X - 0.82X^2, r^2 = 0.984$	141.0	4.61	114.0	4.56
	珙陵(1)	$Y = 156.1 + 23.6X - 0.81X^2, r^2 = 0.999^*$	219.0	4.92	190.5	4.88
	珙陵(2)	$Y = 140.8 + 14.9X - 0.38X^2, r^2 = 0.987$	292.0	4.31	234.0	4.22
	珙陵(3)	$Y = 161.1 + 25.7X - 1.33X^2, r^2 = 0.724$	144.0	4.28	142.5	4.28
2014—2015年	珙陵中仙	$Y = 225.1 + 21.6X - 0.68X^2, r^2 = 0.999^{**}$	237.0	5.94	208.5	5.91
	吕城严家	$Y = 198.3 + 24.6X - 0.92X^2, r^2 = 0.983^{**}$	201.0	5.45	180.0	5.43
	陵口东沟村	$Y = 172.2 + 20.5X - 0.87X^2, r^2 = 0.859$	175.0	4.38	153.0	4.35
2015—2016年	延陵镇	$Y = 184.6 + 28.7X - 1.02X^2, r^2 = 0.967^{**}$	210.0	5.79	192.0	5.76
	陵口镇	$Y = 225.3 + 14.9X - 0.48X^2, r^2 = 0.873^*$	232.5	5.12	193.5	5.07
2016—2017年	陵口镇	$Y = 207.4 + 20.1X - 0.65X^2, r^2 = 0.969^{**}$	231.0	5.43	204.0	5.40
	平均		216.8	5.21	188.1	5.18

注:表中一元二次方程中的 $X$ 代表单位面积土壤的施肥量, $Y$ 代表单位面积小麦产量。\*表示在0.05水平上显著,\*\*表示在0.01水平上显著。下表同。

表7 不同供试地点小麦产量与施磷量回归统计

时间	试验地点	一元二次方程	最高产量对应施磷量 (kg/hm <sup>2</sup> )	最高产量 (t/hm <sup>2</sup> )	最佳施磷量 (kg/hm <sup>2</sup> )	最佳施磷量对应 产量(t/hm <sup>2</sup> )
2013—2014	吕城严家	$Y = 304.8 + 11.6X - 0.96X^2, r^2 = 0.906$	91.5	5.10	70.5	5.07
	吕城河北	$Y = 266.2 + 23.3X - 1.99X^2, r^2 = 0.998^*$	88.5	5.03	78.0	5.01
	宝林农场南	$Y = 441.3 - 3.6X + 1.34X^2, r^2 = 0.990$	21.0	6.59	34.5	6.60
	宝林农场西	$Y = 276.1 + 39.0X - 4.0X^2, r^2 = 0.779$	73.5	5.57	69.0	5.57
	宝林农场东	$Y = 311.1 + 29.2X - 3.49X^2, r^2 = 0.953$	63.0	5.58	57.0	5.58
	宝林农场北	$Y = 260.0 + 26.2X - 3.40X^2, r^2 = 1.000^{**}$	58.5	4.65	52.5	4.65
	珙陵(1)	$Y = 303.4 + 7.4X - 0.79X^2, r^2 = 0.423$	70.5	4.82	46.5	4.79
	珙陵(2)	$Y = 237.6 + 16.9X - 2.47X^2, r^2 = 0.999^*$	51.0	4.01	43.5	3.99
	珙陵(3)	$Y = 284.4 + 23.9X - 2.99X^2, r^2 = 0.845$	60.0	4.98	57.0	4.98
2015—2016	珙陵中仙	$Y = 332.7 + 20.5X - 1.90X^2, r^2 = 0.915$	81.0	5.82	72.0	5.81
	吕城严家	$Y = 306.1 + 21.7X - 2.19X^2, r^2 = 0.785$	73.5	5.40	66.0	5.39
	陵口东沟村	$Y = 219.9 + 43.4X - 4.76X^2, r^2 = 0.998^*$	69.0	4.79	64.5	4.79
2015—2016	延陵镇	$Y = 367.2 + 11.3X - 1.28X^2, r^2 = 0.709$	66.0	5.88	51.0	5.87
	陵口镇	$Y = 291.8 + 19.7X - 1.60X^2, r^2 = 0.855$	93.0	5.30	81.0	5.28
2016—2017	陵口镇	$Y = 320.3 + 10.3X - 0.62X^2, r^2 = 0.849$	126.0	5.46	91.5	5.40
	平均		76.1	5.20	65.7	5.18

注:表中的平均数值是除去2013—2014年宝林农场南和珙陵(1)试验地点后计算的平均值。

## 2.2 不同处理对植株养分吸收的影响

由表9可知,氮、磷、钾肥影响着小麦对氮、磷、钾元素的吸收,3种肥料合理配施更能促进小麦对营养元素的吸收。无N(N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)处理氮素吸收量为51.3 kg/hm<sup>2</sup>,其余有氮处理氮素吸收量为76.7~110.0 kg/hm<sup>2</sup>,随着氮素水平提升,植株吸氮总量增加。小麦对磷、钾的吸收也存在着类似的趋势。该地区种植小麦所需的土壤基础养分N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O的供应量,即处理N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>的吸氮总量、吸磷总量及吸钾总量,分别为51.3、26.4、60.6 kg/hm<sup>2</sup>。

## 2.3 不同处理对肥料利用率的影响

氮磷钾肥料的合理配施能明显提高肥料利用率。在本研

究中,不施氮处理的磷、钾肥利用率极低,相同氮钾水平(2水平,下同)下,不施磷处理氮肥利用率为22.0%,钾肥利用率为21.2%;相同氮磷水平,不施钾处理氮肥利用率为20.1%,磷肥利用率为8.9%,而氮磷钾配合施用其利用率均增加,氮、磷、钾肥利用率分别为30.2%、43.7%和36.0%(表9)。

相同磷钾施用水平下,随氮肥用量增加,肥料利用率先升高后降低,施氮水平为1、2、3时,氮肥利用率分别为26.1%、30.2%、20.2%;相同氮钾施用条件下,施磷水平为1、2、3时,磷肥利用率分别为42.4%、43.7%、29.5%;相同氮磷施用条件下,施钾为水平1、2、3时,钾肥利用率分别为35.1%、36.0%、24.3%。

表8 不同供试地点小麦产量与施钾量回归统计

时间	试验地点	一元二次方程	最高产量对应 施钾量(kg/hm <sup>2</sup> )	最高产量 (t/hm <sup>2</sup> )	最佳施钾量 (kg/hm <sup>2</sup> )	最佳施钾量对应 产量(t/hm <sup>2</sup> )
2013—2014	吕城严家	$Y=290.6+12.3-0.67X^2, r^2=0.999^*$	138.0	5.21	109.5	5.16
	吕城河北	$Y=279.8+13.8X-0.86X^2, r^2=0.999^{**}$	120.0	5.03	99.0	5.01
	宝林农场南	$Y=418.1+25.4X-2.37X^2, r=0.988$	81.0	7.29	72.0	7.29
	宝林农场西	$Y=282.7+16.4X-0.55X^2, r^2=0.874$	222.0	6.06	187.5	6.02
	宝林农场东	$Y=292.1+23.9X-2.02X^2, r^2=0.983$	88.5	5.45	79.5	5.43
	宝林农场北	$Y=274.9+16.8X-1.88X^2, r^2=0.993$	67.5	4.70	57.0	4.68
	珥陵(1)	$Y=216.9+21.7X-1.13X^2, r^2=0.971$	144.0	4.83	127.5	4.80
	珥陵(2)	$Y=197.1+10.3X-0.35X^2, r^2=0.979$	220.5	4.10	166.5	4.02
	珥陵(3)	$Y=312.9+9.6X-1.03X^2, r^2=0.544$	69.0	5.03	63.0	5.03
2015—2016	珥陵中仙	$Y=298.3+17.9X-0.96X^2, r^2=0.901$	139.5	5.73	123.0	5.72
	吕城严家	$Y=289.4+19.4X-1.30X^2, r^2=0.898$	111.0	5.43	99.0	5.42
	陵口东沟村	$Y=255.1+17.9X-1.31X^2, r^2=0.999^{**}$	103.5	4.76	91.5	4.74
2015—2016	延陵镇	$Y=347.2+11.6X-0.79X^2, r^2=0.794$	109.5	5.84	87.0	5.82
	陵口镇	$Y=304.7+9.8X-0.49X^2, r^2=0.778$	147.0	5.30	112.5	5.25
2016—2017	陵口镇	$Y=320.6+9.4X-0.51X^2, r^2=0.975$	138.0	5.46	85.5	5.36
平均			126.6	5.35	104.0	5.32

表9 氮磷钾肥料不同配比对小麦氮磷钾吸收及利用的影响

处理编码	吸氮总量 (kg/hm <sup>2</sup> )	吸磷总量 (kg/hm <sup>2</sup> )	吸钾总量 (kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥利用率 (%)	磷肥利用率 (%)	钾肥利用率 (%)
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	51.0	24.0	47.6	—	—	—
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	51.3	27.9	62.9	—	4.6	2.4
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	76.7	32.4	75.5	26.1	18.1	15.9
N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	93.9	26.4	80.4	22.0	—	21.2
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	99.5	33.5	88.2	24.9	42.4	29.5
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	109.7	41.0	94.2	30.2	43.7	36.0
N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	98.3	41.3	80.9	24.3	29.5	21.7
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	90.2	29.4	60.6	20.1	8.9	—
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	98.9	37.4	77.0	24.6	33.0	35.1
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	97.2	37.2	94.7	23.8	32.5	24.3
N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	110.0	36.5	94.1	20.2	30.2	35.8
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	79.4	30.9	69.8	29.0	27.0	9.8
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	76.7	32.4	67.5	26.2	18.1	14.8
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	86.6	33.6	63.9	18.2	43.3	7.1

### 3 讨论

自全国第2次土壤普查以来,由于缺少全国性田间试验结果的积累,同时经过30多年来土壤培肥肥料的使用,土壤地力发生了巨大的变化<sup>[15-16]</sup>。因此,研究不同农业生态区、不同作物种植土壤肥力分级指标及相应的推荐施肥量,将对我国测土配方施肥工作给予很好的补充<sup>[16]</sup>。针对某局部地区,在特定土壤和作物条件下对施肥推荐量的研究已有报道<sup>[17]</sup>,而本研究则以土壤地力不同,灌溉条件和耕作制度相对一致的生态类型区域为研究单元,确定最佳经济施肥量,强化太湖流域小麦施肥的针对性,研究结果对农业生产实践有一定的指导意义。

氮磷钾肥料的施用对小麦的产量影响很大,虽然已有大量研究报道了小麦的推荐施肥量,但不同的生态区土壤类型、气候因子等条件差异导致研究结果间存在差异<sup>[18]</sup>。由于区

域差异较大,各地小麦推荐施肥量也不尽相同,本研究基于改进的“3414”试验研究了丹阳市小麦在不同土壤肥力水平下的N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O最佳推荐施肥量,分别为188.1、65.7、104.0 kg/hm<sup>2</sup>。其中高等地力最佳施肥量N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O分别为217.5、71.3、108.0 kg/hm<sup>2</sup>,三者比为1:0.33:0.50;中等地力最佳施肥量N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O分别为192.8、67.1、114.6 kg/hm<sup>2</sup>,三者比为1:0.35:0.59;低等地力最佳施肥量N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O分别为136.5、58.0、70.5 kg/hm<sup>2</sup>,三者比为1:0.42:0.52。本研究结果对该地区不同土壤地力条件下小麦生产具有一定的实践指导意义。

氮磷钾合理配施往往能提高作物对土壤养分的吸收,从而提高肥料的利用率<sup>[19-20]</sup>。本研究发现,在一定范围内,随施肥量增加小麦产量递增,当施肥量过量时,小麦的产量和肥料利用率呈下降趋势,该现象反映了肥料施用的“报酬递减”规律<sup>[21-22]</sup>。龙素霞等发现,适宜的氮磷钾配施能有效调控生

育期间土壤的养分供应特性,进而增强植株养分吸收和产量形成的能力<sup>[23]</sup>。总之,要使作物稳产高产并提高作物养分吸收率,需要重视氮磷钾肥的科学配施。本研究发现,氮素是影响小麦产量的主要因素,其次为钾,再次为磷,这与谭和芳等的研究结果<sup>[13]</sup>一致。马志超等研究发现,合理地施用钾肥可以促进冬小麦产量的提高<sup>[24]</sup>。另外,本研究发现小麦推荐的钾肥施用量较大,一方面可能与农民传统施肥习惯有关,另一方面有利于小麦的生长。党红凯等通过对小麦生育时期植株进行采样分析发现,小麦对钾的吸收和分配特点关系到小麦的生长发育与钾肥施用技术的选择<sup>[25]</sup>。

总之,由于近些年人们耕作和施肥方式的改变,土壤地力及有效养分的不同,作物相对产量水平发生了很大变化<sup>[26-27]</sup>。虽然可以应用“3414”设计试验技术建立作物氮、磷、钾的测土配方施肥指标体系,确定最佳施肥量,但在实际应用中,也需要注意与施肥方法相结合,这将在未来展开研究<sup>[28-29]</sup>。

#### 4 结论

在不同土壤肥力条件下,与缺素区相比,施用氮、磷、钾肥料对小麦产量的相对增产效果为  $N > K > P$ 。该地区土壤基础养分供应量  $N$ 、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  分别为 51.3、26.4、60.6  $kg/hm^2$ 。在一定范围内,随施肥量增加产量递增,一旦过量使用,作物产量反而出现下降趋势,同时肥料利用率呈下降趋势。在本试验条件下,氮(N)、磷( $P_2O_5$ )、钾( $K_2O$ )施用量分别为 188.1、65.7、104.0  $kg/hm^2$  是丹阳市主栽小麦品种的最佳经济施肥量,小麦对氮肥、磷肥、钾肥利用率分别为 30.2%、43.7%、36.0%。

#### 参考文献:

[1]李修平. 我国不同生态区小麦氮肥的肥效反应[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(15): 4640-4641.

[2]Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106: 3041-3046.

[3]吴良泉,武良,崔振岭,等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-217.

[4]吴良泉,武良,崔振岭,等. 中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(9): 1-13.

[5]李亮科,张卫峰,王雁峰,等. 中国农户复合(混)肥施用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 623-629.

[6]贾丽娜,张俊丽,卢超,等. 种植密度对渭北旱作区小麦群体性状和产量的影响[J]. 中国农学学报, 2019, 35(7): 15-19.

[7]兰涛,潘洁,姜东,等. 生态环境和播期对小麦籽粒产量及品质性状间相关性的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(4): 72-78.

[8]陈新平,张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. 中国农技推广, 2006, 22(4): 36-39.

[9]王华良,何小卫. 2008年绩溪县水稻“3414”肥料效应田间试验报告[J]. 土壤, 2009, 4(1): 320-323.

[10]王桂梅,邢宝龙,张旭丽,等. 绿豆“3414”肥效试验及平衡施肥技术[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(10): 36-38.

[11]危天进. 不同肥力水平土壤上仙草氮磷钾肥料效应研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(21): 69-74.

[12]韩彦龙,晋凡生,李晓平,等. 干旱冷凉区红芸豆施肥效应与养分吸收研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(15): 73-78.

[13]谭和芳,谢金学,汪吉东,等. 氮磷钾不同配比对小麦产量及肥料利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(3): 279-283.

[14]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999: 308-316.

[15]孙义祥,郭跃升,于舜章,等. 应用“3414”试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 197-203.

[16]刘芬,同延安,王小英,等. 陕西关中灌区冬小麦施肥指标研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 556-563.

[17]董县中,贺德先,吴寅. 豫西南浅山丘陵区小麦测土配方施肥技术研究[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(5): 685-691.

[18]赵广才. 中国小麦种植区域的生态特点[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 684-686.

[19]李成亮,何园球,王艳玲,等. 氮磷钾肥对红壤区水稻增产效应的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 179-184.

[20]杨同荣,张思斌,方剑,等. 氮磷钾配施对小麦产量的影响[J]. 河北农业科学, 2007, 11(1): 66-67.

[21]陆景陵. 植物营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2003: 211-218.

[22]鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京:化学工业出版社, 1998: 377-378.

[23]龙素霞,李芳芳,石书亚,等. 氮磷钾配施对小麦植株养分吸收利用和产量的影响[J]. 作物杂志, 2018(6): 96-102.

[24]马志超,张明学,周仓军,等. 关中西部冬小麦氮磷钾养分丰缺指标及经济最佳施肥量研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(24): 210-216.

[25]党红凯,李瑞奇,李雁鸣,等. 超高产冬小麦对钾的吸收、积累和分配[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 274-287.

[26]邵云,王敬娣,冯荣成,等. 耕作方式和有机物料还田对小麦叶片光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 69-73.

[27]刘红亮,李凤海,步蕴法,等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 52-54.

[28]刘苹,谭德水,徐钰,等. 施肥方法对小麦专用控释氮肥肥效的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3897-3908.

[29]黄明,王朝辉,罗来超,等. 垄覆沟播及施肥位置优化对旱地小麦氮磷钾吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1158-1168.