

水氮调控对休耕期土壤养分迁移及翌年土壤肥力的影响

王美荣, 史海滨, 闫建文, 李仙岳, 窦旭, 丁宗江

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为研究河套灌区盐碱农田不同施氮量在冻融作用后对翌年春播前土壤肥力的影响效应, 结合翌年土壤肥力状况确定当地适宜的施氮量。采用田间试验的方法, 共设置4个施氮水平(高氮 N_3 : 325 kg/hm²; 中氮 N_2 : 225 kg/hm²; 低氮 N_1 : 125 kg/hm²; 不施氮 N_0) 研究冻融期内水盐时空分布、全氮、碱解氮以及有机质含量的变化规律, 并采用主成分分析法对翌年春播前土壤肥力进行综合评价。结果表明: (1) 秋浇后, 土壤含水率显著高于秋浇前, 表层土壤含水率增加, 开始冻结时, 水分向表层积聚, 随着温度降低水分自表层向深层冻结, 各处理灌溉水平相同, 不同施氮处理之间对土壤含水率的影响不显著, 土壤墒情满足作物对水分的需求; 秋收后耕层土壤含盐率随生育期内施氮量的增加而增加, 施氮量越大土壤含盐率递增。秋浇后大量盐分被淋洗, 融化后盐分受到融冻水的下渗和蒸发的共同作用, 使得各处理表层含盐率为 N_0 (0.14%) < N_1 (0.17%) < N_2 (0.19%) < N_3 (0.45%), 高氮处理发生土壤次生盐碱化; (2) 冻融期内土壤养分主要集中在土壤表层(0—20 cm), 土壤中的全氮、碱解氮和有机质含量在冻融期内呈现先增大后减小的变化规律, 最大值出现在最大冻深期, 说明冻结作用有助于全氮、碱解氮以及有机质的累积; (3) 运用主成分分析法对翌年春播前土壤肥力进行综合评价, 在 PC1 和 PC2 上有机质、有机碳以及全磷有较高的因子负荷, 对土壤肥力的贡献率较高。从综合得分情况来看 (N_3 < N_0 < N_1 < N_2), 高氮处理的土壤肥力低下, 中氮处理综合得分最高, 土壤肥力情况最佳, 根据综合分析推荐该地区玉米生育期内施氮肥量为 225 kg/hm² (基肥 20%、拔节期 40% 和抽雄期 40%) 左右, 有利于翌年春播前土壤培肥, 使农业得以持续的发展。

关键词: 秋浇; 冻融作用; 不同施氮量; 肥力水平; 主成份分析

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0146-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxcx.2019.02.024

Effects of Water and Nitrogen Regulation on Soil Nutrient Transfer During Fallow Period and Soil Fertility in the Following Year

WANG Meirong, SHI Haibin, YAN Jianwen, LI Xian Yue, DOU Xu, DING Zongjiang

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018)

Abstract: Studying the effects of different nitrogen application amount on soil fertility before spring sowing could help determine the suitable nitrogen application amount in Hetao Irrigation Area. In this study, four nitrogen application levels (high-nitrogen N_3 : 325 kg/hm², medium-nitrogen N_2 : 225 kg/hm², low-nitrogen N_1 : 125 kg/hm², and no nitrogen application N_0) were set up in the field experiment. The spatial and temporal distribution of water and salt and the changes of total nitrogen, alkali-hydrolysis nitrogen and organic matter contents were studied during freezing-thawing period. Then the soil fertility was evaluated by principal component analysis. The results showed: Firstly, after autumn water application, soil moisture content was significantly higher than before. The surface soil moisture content increased. When it just began to freeze, soil water accumulated to surface layer, and then froze to the deeper layer as the temperature reduced. The irrigation rates were the same in different treatments. The impacts of different nitrogen treatments on the soil moisture content was not significant. The soil moisture could meet the crop water demand. The soil salinities increased with the increasing nitrogen application rates during the growth period. A large amount of salt was leaching when water was applied in autumn. Soil salt was subjected to the combined effects of infiltration and evaporation during the water thawing, resulting in that the surface soil salinities were N_0 (0.14%) < N_1 (0.17%) < N_2 (0.19%) < N_3 (0.45%). Secondly, during freeze-thaw period, soil nutrients were mainly

收稿日期: 2018-10-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(51509132)

第一作者: 王美荣(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: 745908720@qq.com

通信作者: 闫建文(1985—), 男, 助理研究员, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: baotouyan13579@163.com

concentrated in the surface soil layer of 0—20 cm. During the freeze-thaw period, the contents of total nitrogen, alkali-hydrolysis and organic matter in the soil showed a change pattern of first increasing and then decreasing. The maximum value occurred in the maximum freeze-thaw period, indicating that freezing helped the accumulation of total nitrogen, alkali-hydrolysis and organic matter. The last, soil fertility was comprehensively evaluated before the next spring sowing. Organic matter, organic carbon and total phosphorus on PC1 and PC2 had higher factor loads, contributing to soil fertility. Considering from the composite scores ($N_3 < N_0 < N_1 < N_2$), high nitrogen treatment led to the low soil fertility, and the highest scores were given in the medium nitrogen treatment, resulting in the highest soil fertility. Therefore, it is recommended that the nitrogen application rate should be around 225 kg/hm² for the maize growth, and 20% for the basal, 40% for the jointing stage and 40% for the tasseling stage respectively. This fertilization will be beneficial for the improvement of the soil fertility in the following spring sowing and also for the agricultural sustainable development.

Keywords: autumn water; freeze-thaw action; different nitrogen application amount; fertility level; principal component analysis

土壤是农业的基础,肥料是作物的“粮食”,化肥是当前世界粮食生产增长不可缺少的重要因素^[1]。生产和使用化肥是农业生产和科学实践发展到一定阶段的必然产物,充分和合理使用肥料是促进作物增产、加速农业发展的有效途径。化肥的使用极大地推动农业生产的发展,较大幅度地提高作物的产量,保障中国粮食安全,对国民经济的发展和促进农业增产增收具有十分重要的作用^[2]。内蒙古河套灌区是我国北方重要的农业生产区,但仍存在着过量施肥等不合理的农作方式,当地化肥施用大部分为氮肥,由于受到高产的诱惑,当地氮肥投入量远远超过经济最佳施氮量,导致产量不再增加或有所下降,同时氮肥在土壤中残留量或损失到环境中的量会显著增加,造成大气和水体的污染^[3]及越来越严重的农业面源污染^[4]。大部分研究者^[5-10]从玉米生育期内对作物的生长指标、产量、土壤肥力等方面来评价不同施肥量对土壤肥力的响应。以往关于水氮调控对氮素转换迁移影响的研究关注的是作物生长期不同的水氮用量对氮素在土壤—大气—植物中迁移转化规律的影响,更关注水氮调控的前期效应。而很少有研究关注冻融期氮素迁移转化规律对前期水氮调控的响应,以及对不同水氮用量土壤在冻融作用后次年播前土壤氮素肥力的变化等水氮调控的后期影响。结合当地的气候特征,试验区受季节性冻结型冻融影响^[11],该地区采取秋浇措施来调整土壤墒情,对农田水盐运动特性和土壤中残留养分的迁移过程都有影响。季节冻融作用使土壤中微生物种群和生命活动过程与生长季节不同^[12]。从目前的文献可知,大部分冻融研究^[13]开展在没有人水氮投入的自然生态系统(森林生态系统),很少考虑农田生态系统中人为水氮调控在冻融期氮素转化迁移的影响,对农业生产灌水施氮没有直接的参考价值。对于土壤肥力的评价方法甚多^[14],研究者们^[15-17]运用主成分分析的方法

对土壤肥力进行评价,方法实用性高,准确度高。很少有研究者针对冻融期内农田水盐及养分运移规律,耕作期不同施氮量对翌年播种前土壤肥力的影响进行研究。因此,开展盐渍化农田土壤冻融期氮素迁移转化规律对前期水氮调控的响应和冻融后土壤肥力影响的研究,对如何调控前期水氮用量有重要的指导意义。本文从冻融期中的土壤水盐时空分布、养分迁移的过程及耕作期不同施氮量对春播前耕层土壤水、盐、养分差异性进行分析,运用主成分分析方法对春播前土壤肥力进行综合评价,进一步确定当地合适的施氮量范围,以防止该地区发生次生盐碱化而影响土壤本身培肥能力,对实现灌区农业的可持续发展具有十分重要的意义。

1 试验设计

1.1 试验区概况

试验在内蒙古河套灌区曙光试验站(40°46'N, 107°24'E)研究进行。该试验区位于河套灌区中上游,属于干旱半干旱气候带,典型的温带大陆性气候,年平均气温6.9℃,降水量集中,蒸发强烈,空气干燥,日温差较大。该地区土壤开始冻结于11月中下旬,最大冻深0.7~0.9 m,3月中旬冻土开始消融,4月下旬冻融期结束,冻融历时180 d,冻融期内平均气温0.77℃,最高气温出现在10月,为31.1℃,最低气温出现在1月,为-23.4℃,总降水量39.9 mm,多集中于3月初,地下水埋深2.5 m。平均风速0.64 m/s,最大平均风速9.64 m/s,试验区内土壤属于黄河灌淤土,土层分层明显,耕作层(0—40 cm)土壤容重平均为1.41 g/cm³,田间持水率平均为20.21%(质量含水率),土壤全氮、全磷、全钾、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾质量比分别为1.27,0.53,22.81,7.37 g/kg和32.95,14.54,135.58 mg/kg,按照表1全国第2次土壤普查养分分级标准^[18]进行评价,该土壤养分处于较缺等级。

表 1 全国第 2 次土壤普查养分分级标准

分级	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · g ⁻¹)	有效磷/ (mg · g ⁻¹)	速效钾/ (mg · g ⁻¹)
很丰	>40	>2	>1	>25	>150	>40	>200
丰富	30~40	1.5~2	0.8~1	20~25	120~150	20~40	150~200
中等	20~30	1~1.5	0.6~0.8	15~20	90~120	10~20	100~150
稍缺	10~20	0.75~1	0.4~0.6	10~15	60~90	5~10	50~100
较缺	6~10	0.5~0.75	0.2~0.4	5~10	30~60	3~5	30~50
极缺	<6	<0.5	<0.2	<5	<30	<3	<30

1.2 试验设计

于 2016 年 4—10 月进行田间试验,作为冻融期间的准备工作。种植作物为玉米,设置高氮 N₃(325 kg/hm²)、中氮 N₂(225 kg/hm²)和低氮 N₁(125 kg/hm²)3 个施氮水平处理及 1 个无氮 N₀(0 kg/hm²)处理作为对照,试验共 4 个处理,每个处理进行 3 次重复,共 12 个小区,小区长 6 m,宽 6 m,面积为 36 m²。试验采用“一膜两行”的种植方式,种植密度 50 000 株/hm²。灌溉定额为 2 250 m³/hm²,共灌水 3 次,各处理灌水量相同,分别在玉米拔节期、抽雄期和灌浆期进行灌水,各处理灌水次数与日期均相同,灌水方式为畦灌,灌水量用水表控制。基肥为尿素(含 N:46%)和磷酸二铵(含 P₂O₅:46%),追肥为尿素(含 N:46%)。各处理磷肥施用量相同,均为 300 kg/hm²,且与当地农民相同,全部作为基肥施入。氮肥分 3 个不同生育期施入,分别为基肥 20%、拔节期 40%和抽雄期 40%,灌溉前撒施在行间。为避免试验小区的边行效应,小区 1 m 深土体四周埋设以 2 层塑料薄膜相隔,防止水分侧渗和肥料的影响。各处理耕作等措施一致。

田间玉米种植试验结束后,于 2016 年 10 月至翌年 4 月进行冻融试验。在 11 月 1 日控制水量进行秋浇,灌溉定额为 1 500 m³/hm²。分别在秋浇前(10 月 25 日)、秋浇后(11 月 27 日)、冻结期(1 月 5 日)、最大冻深期(2 月 15 日)、融化期(3 月 14 日)和融化后(4 月 18 日)6 个时期采用 HS-300 型动力取土器进行土样采集,为减少试验的随机误差,试验田块内“梅花”形选定 5 个取样点。

1.3 测定项目与方法

(1)气象数据测定:在试验站内设置自动气象站(HOBO-U30),每 1 h 自动记录降水量、太阳辐射、空气温度、空气湿度和风速等;

(2)冻融土壤含水率测定:分别在 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层取土样,采用称重烘干法测定土壤含水率;

(3)土壤含盐率测定:取样位置与土壤含水率相同,将风干土样粉碎过 1 号筛,取土水比 1:5 混合搅拌、离心,将离心后的提取液采用 DDS-11A 电导率

仪测其 EC 值,再采用公式 $St' = EC_{1:5} \times 3.7657 - 0.2405^{[19]}$ 计算土壤含盐量,利用公式 $St = St' \times 1000/100$ 计算土壤含盐率;

(4)土壤养分测定:土样采用分光光度计与火焰光度计仪器对土壤养分进行检测,其养分包括全氮、碱解氮、全钾、速效钾、全磷、有效磷和有机质含量;

(5)地下水测定:采用农田气象、墒情、水位自动监测系统监测地下水埋深的变化,7 天取 1 次水样测定电导率值;

(6)土壤温度测定:用 HTR-8 型温度记录仪测定土壤温度,记录间隔为 60 min,探头埋设与取土深度相同。

1.4 数据处理

原始数据运用 Excel 2010 软件整理与制图,用 SPSS 17.0 软件进行差异性分析与主成分分析,采用 Suffer 12.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 冻融期气温与土壤冻融特性

2.1.1 地表温度与气温关系 地表负温强度是引起土壤冻结的根本原因,土壤冻结深度与负积温的平方根成正比^[20]。土壤表层的地温是随着大气温度的降低而降低。负温强度随着温度梯度向深层土壤进行传递。冻融期内大气温度负积温为-601.9℃/d。对土壤表层 10 cm 处地温负积温(Y)与气温负积温(x)进行回归分析,得到回归方程为: $Y = 0.4561x - 8.517$,决定系数 $R^2 = 0.9934$,两者之间具有较高的相关性。

2.1.2 盐渍土壤冻结融化过程 冻结温度是判别土壤是否处于冻结状态的指标,纯水的冰点为 0℃,土中水分由于受到土颗粒表面能的束缚且还有化学物质,其冻结温度低于 0℃。其冻结温度是土壤含水率与土壤含盐率的函数。本试验冻结期内土壤含水率为 26.82%~39.69%,土壤含盐率为 0.13%~0.54%,根据相关文献[21]可知其土壤冻结温度在-0.8~0℃。本文以实测地温数据为基础,利用初始冻结温度等温线深度代替冻结锋面,来确定冻土层的下边界。利用日平均气温达到-0.8~0℃来确定冻土层的上边

界,相应日期为该土层的冻结日期。冻结期气温日变化见图1。10月29日至11月19日,日平均气温在 0°C 以上,但日最低气温在 0°C 以上。11月19日以后日平均气温稳定在 0°C 以下,1月24日气温达到最低为 -23.4°C 。3月14日后大气回温在 0°C 以上。冻融期内平均气温为 -2.32°C 。

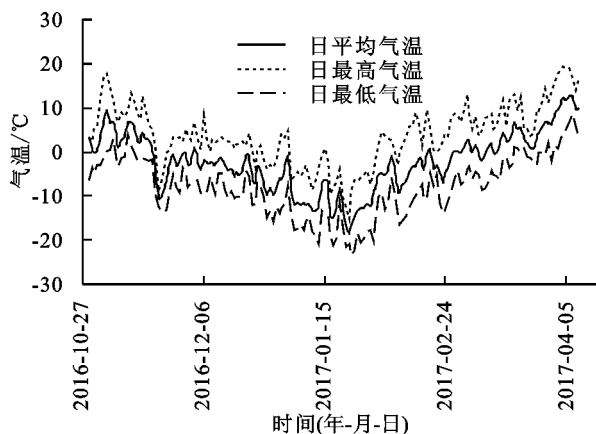


图1 冻融期气温日变化

土壤冻结融化过程见图2。11月1日进行秋浇,秋浇后初期,土壤表层有积水,缓慢向下入渗。12月上旬土壤开始冻结,冻结深度随着冻结过程的进行逐渐加深。在2月15日左右冻深达到最大,为 $88\sim 95\text{ cm}$ 。3月14日,随着外界温度的升高,冻结层自上而下,自下而上双向消融,中间隔层形成似冻层。4月18日土层全部通融进入融化后期。

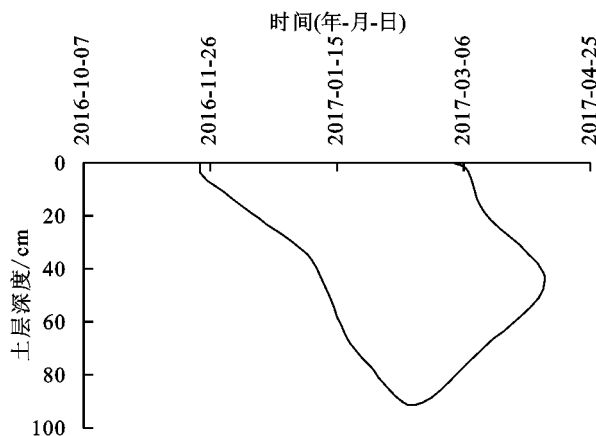


图2 土壤冻结融化推进过程

2.2 土壤含水率、含盐率与地下水位的变化规律

2.2.1 冻融期地下水位及电导率的变化 冻融期内地下水位动态变化见图3。地下水埋深变化趋势为先升后降。秋浇前地下水埋深为 2.81 m ,在10—11月河套灌区进行大规模的秋浇,秋浇后地下水埋深回升至 0.61 m ,回升速率为 53.66 mm/d ,封冻前(11月29日)地下水位降低为 1.39 m ,降低速率为 39 mm/d ,在土壤从土层向下冻结过程中至翌年2月23日,地下水位降低为 2.23 m ,降低速率为 9.8 mm/d ,由于大部分水分被冻结在冻土层,使得降低速率减

少,在3月初土壤进入了融化期,地下水埋深有所增加,增加幅度最大为 0.18 m ,融化是双向消融过程,20—50 cm土壤呈现冻结过程,50 cm土层以下融化后使得地下水位埋深增加。在消融后期,土层全部通融,地下水位埋深迅速降低为 2.63 m ,降低速率为 22.17 mm/d ,升幅为 0.18 m ,翌年播前耕层土壤水分适宜。地下水的电导率在秋浇后至11月中旬快速升高,最大值为 6.35 mS/cm ,由于大规模的灌水淋洗了土壤盐分,使得土壤EC值突增。在冻结期和最大冻深期EC值保持在 $3.026\sim 4.552\text{ mS/cm}$ 。在3月上旬进入消融期,其EC值有所增加,由于消融水携带部分盐分下渗所导致。

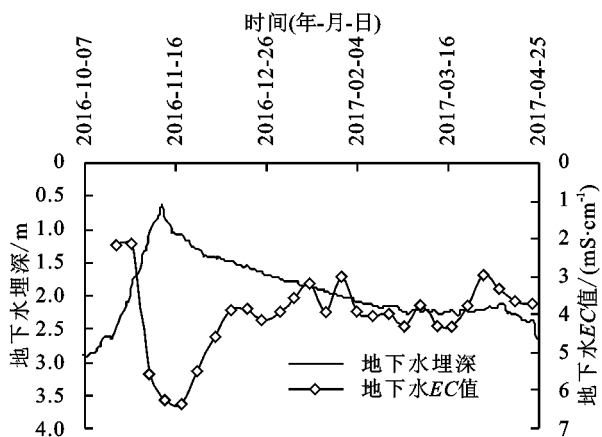


图3 冻融期内地下水位与EC值动态变化

2.2.2 冻融期土壤含水率与含盐率变化规律 从图4可以看出,秋浇前耕层土壤受外界大气蒸发所致,土壤含水率较低,为 $6.43\%\sim 9.21\%$ 。土壤含盐率分别为 $S_{23}(0.43\%)>S_{22}(0.37\%)>S_{21}(0.19\%)>S_{20}(0.17\%)$,与作物生育期内施氮量相关。两者之间拟合二次项方程为 $S_t = 0.000002N_n^2 + 0.000396N_n + 0.158622, R^2 = 0.92$ 。由拟合方程可知,土壤含盐率随着生育期内施氮量的增加而增加,施氮量越大,含盐率增加速率递增。秋浇后,各处理土壤含水率迅速升高,达到超饱和状态;土壤表层盐分由于淋洗作用呈现脱盐现象。冻结期内土壤含水率由于土壤水分达到超饱和状态多余的重力水在重力作用下向下运动补给地下水,使在冻结前土层内土壤含水率较秋浇后有所降低。在融化初期表层冻结土层和深层土壤温度率先回温在 0°C 以上,土层进入了融化期,由于土壤融化过程是自上而下、自下而上的双向融化。耕层土壤含水率在饱和含水率和田持之间,满足春播土壤提供给农作物的水分要求。融化期土壤冻层的融化是由上层和下层向中间开始缓慢融通,由于受到大气温度的影响,上层土壤要比下层土壤融化的快,而中间冻结层就起到了一个隔绝上层水分下渗的作用,上层土壤随着水分的蒸发而累积于土壤表层。融化后期高氮处理发

生次生盐碱化,其他处理均有良好的脱盐效果,耕层土壤含盐率满足作物耐盐要求^[22]。

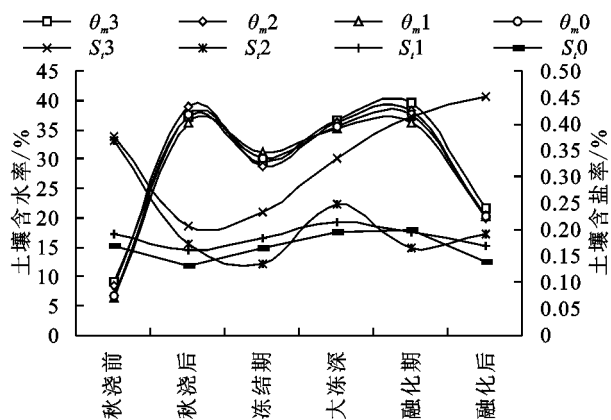


图 4 冻融期耕层土壤含水率(θ_m)与土壤含盐率(S_i)变化

从图 5 可以看出,秋浇后各处理土壤含水率迅速增加,在秋浇后至冻结期含水率为 26.51%~28.83%。最大冻深期土壤含水率比冻结期增加了 3.13%~4.98%,因为在 2 月下旬深层土壤冻结所致。融化期土壤含水率为 28.13%~29.39,耕层土壤与深层土壤之间存在冻层,深层土壤消融,部分多余水分补给地下水。融化后期,土层全部融通,土壤水下渗土壤含水率有所降低。秋浇后耕层土壤盐分向深层土壤迁移,耕层土壤脱盐,各处理深层土壤含盐率增加。各处理含盐率分别增加的百分比为 $S_{,3}$ (0.39%) > $S_{,2}$ (0.21%) > $S_{,0}$ (0.1%) > $S_{,1}$ (0.07%)。从冻结期至融化后期,高氮处理土壤含盐率先降后升,其他处理均降低。综上所述,高氮处理不仅会造成资源浪费,耕层土壤发生次生盐渍化,深层土壤储蓄盐分,对地下水土环境造成一定的威胁。

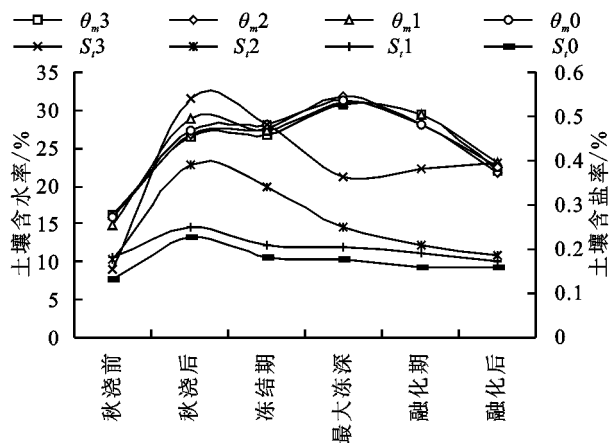


图 5 冻融期深层土壤含水率(θ_m)与土壤含盐率(S_i)变化

2.3 冻融期土壤养分迁移转化

2.3.1 冻融作用对全氮、碱解氮分布迁移的影响

由图 6 可知,各处理土壤中的全氮含量在耕层积聚。在冻融期内其含量呈先减小后增大再增加的变化规律,0—20 cm 峰值出现在冻结期,是由于冻结作用下土

壤团聚体的破坏导致矿质态氮的增加,致使全氮含量显著增加。 N_3 和 N_2 处理在春播前较秋收后的全氮含量降低,反而 N_1 和 N_0 全氮在春播前增加。土壤温度、水分、理化性质、通气性以及碳氮比等因素影响微生物的活性,进而影响土壤中氮素的转化,秋浇和冻融过程改变了土壤氮素转化的影响因素^[23]。

碱解氮反映土壤近期内氮素的供应情况,由图 7 可知,在整个冻融期内,耕层的碱解氮含量均高于深层土壤,出现碱解氮在耕层土壤积聚现象,并在冻结后期和融化期达到峰值。由于消融过程影响土壤矿化过程中微生物的存活和活性,使得更有利于碱解氮的累积。翌年春播前较秋收后碱解氮含量在耕层土壤平均增加 6.95 mg/kg,说明冻结作用有助于碱解氮的累积。

2.3.2 冻融作用对有机质含量的影响 由图 8 可知,在整个冻融过程中,有机质质量比变化趋势为“大小大”,秋浇后比秋浇前有机质含量平均下降 14.19%,是由于秋浇大量水分的下渗作用导致有机质含量向下运移,冻结期有机质含量减小是由于前期秋浇原因下渗,土壤有机质的有效性在冻结过程中由于低温通常很低;在消融期,有机质含量显著增加,是由于一方面冻融作用使团聚体发生膨胀与收缩,从而破坏团聚体间的结合,使大团聚体分解成小团聚体后,比表面积增大;另一方面是由于微生物大量繁殖,上一年的植物残留物腐殖化增加了腐殖质的积累量,从而增加有机质的含量;春播前,中水零肥处理的有机质含量显著低于其他处理,由于作物生育期没有肥料的投入,作物残留物较其他处理较低,在整个冻融期变化差异不是很明显;春播前有机质含量显著高于秋浇前,说明冻融作用有利于有机质的积累。中氮处理在春播前有机质含量最大,为 13.34 g/kg,其次为低氮处理,为 12.09 g/kg。

2.3.3 不同处理春播前耕层土壤水、盐、养分差异性分析 在玉米播种前,耕层土壤的养分含量以及合理施用基肥是提高玉米产量的重要途径,不同施氮量对翌年播前土壤水盐与养分含量的影响见表 2。不同处理土壤含水率的大小在田间持水率(20.21%)和饱和含水率(31.16%)之间,春播前均满足作物对土壤水分的要求, N_3 处理土壤含水率较其他处理显著增大,由于 N_3 处理表层土壤出现泛盐现象,表层土壤相对于 N_2 、 N_1 和 N_0 处理蒸发强度降低,导致土壤含水率较高。 N_2 、 N_1 和 N_0 处理之间土壤含水率差异性不显著。不同处理之间全氮、碱解氮、有机质含量以及土壤含盐率差异显著。 N_3 处理的盐分较大,抑制了土壤的培肥能力。 N_2 与 N_1 处理养分含量比 N_3 与 N_0 处理较大。

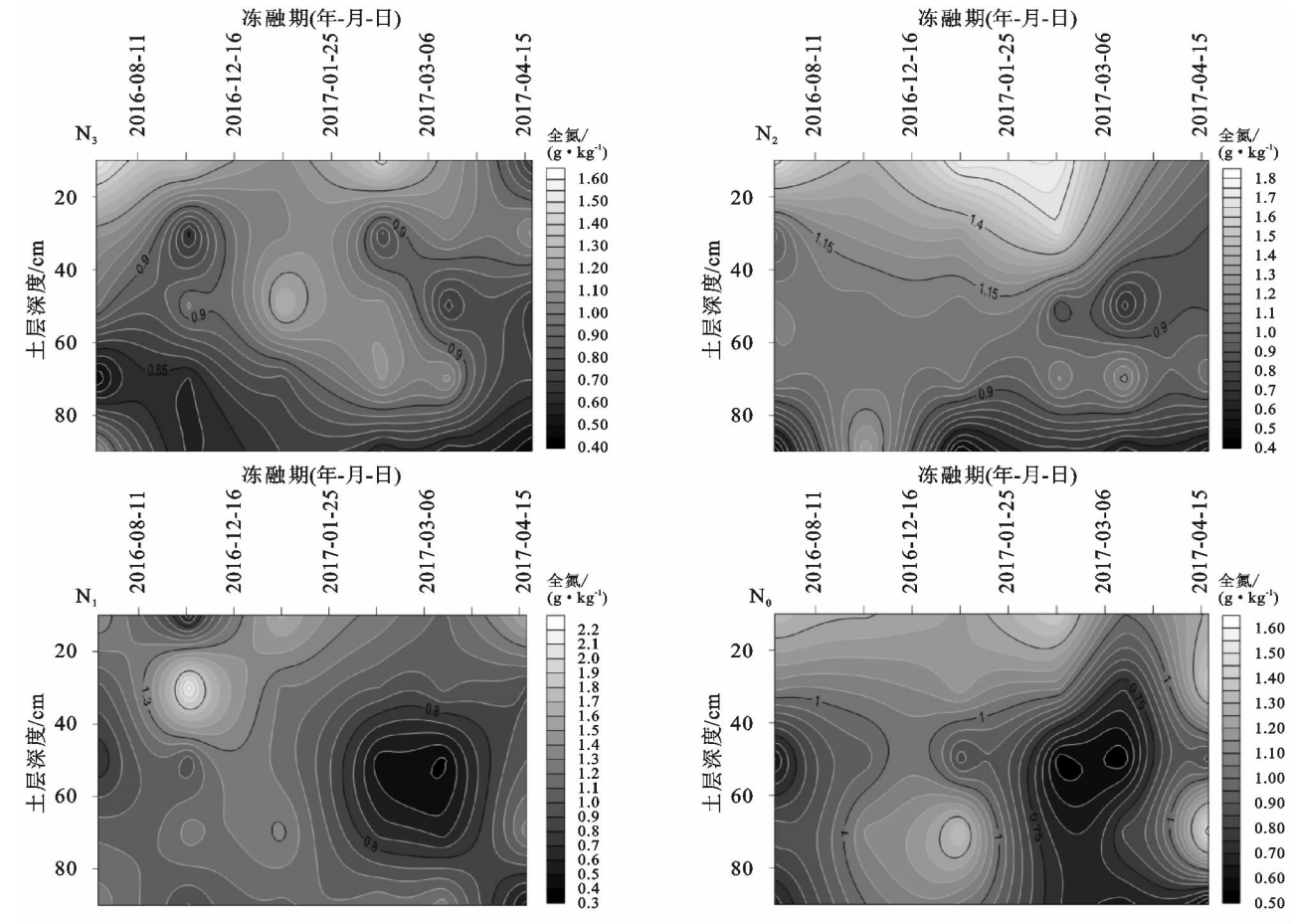


图 6 冻融期全氮含量变化

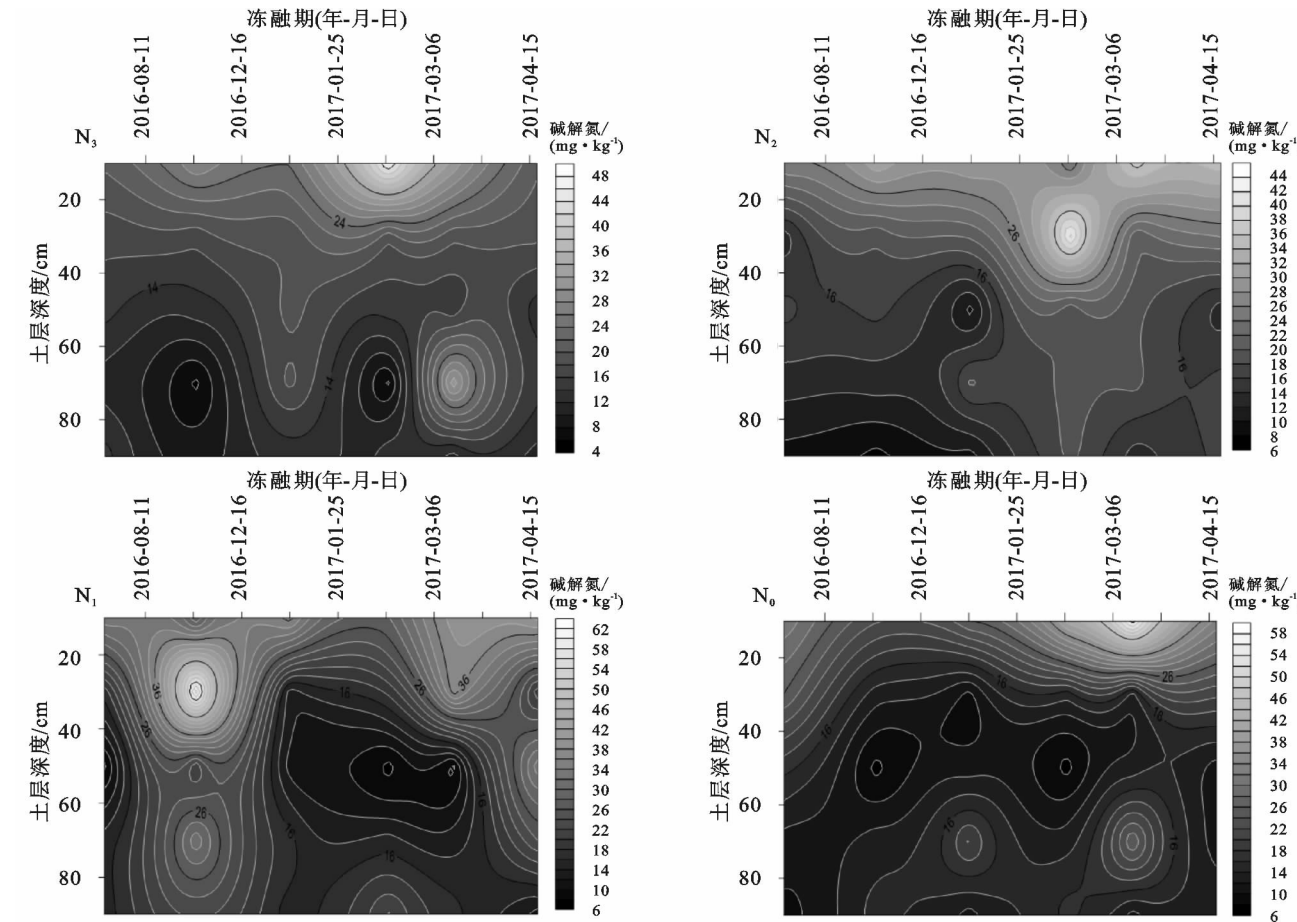


图 7 冻融期碱解氮含量变化

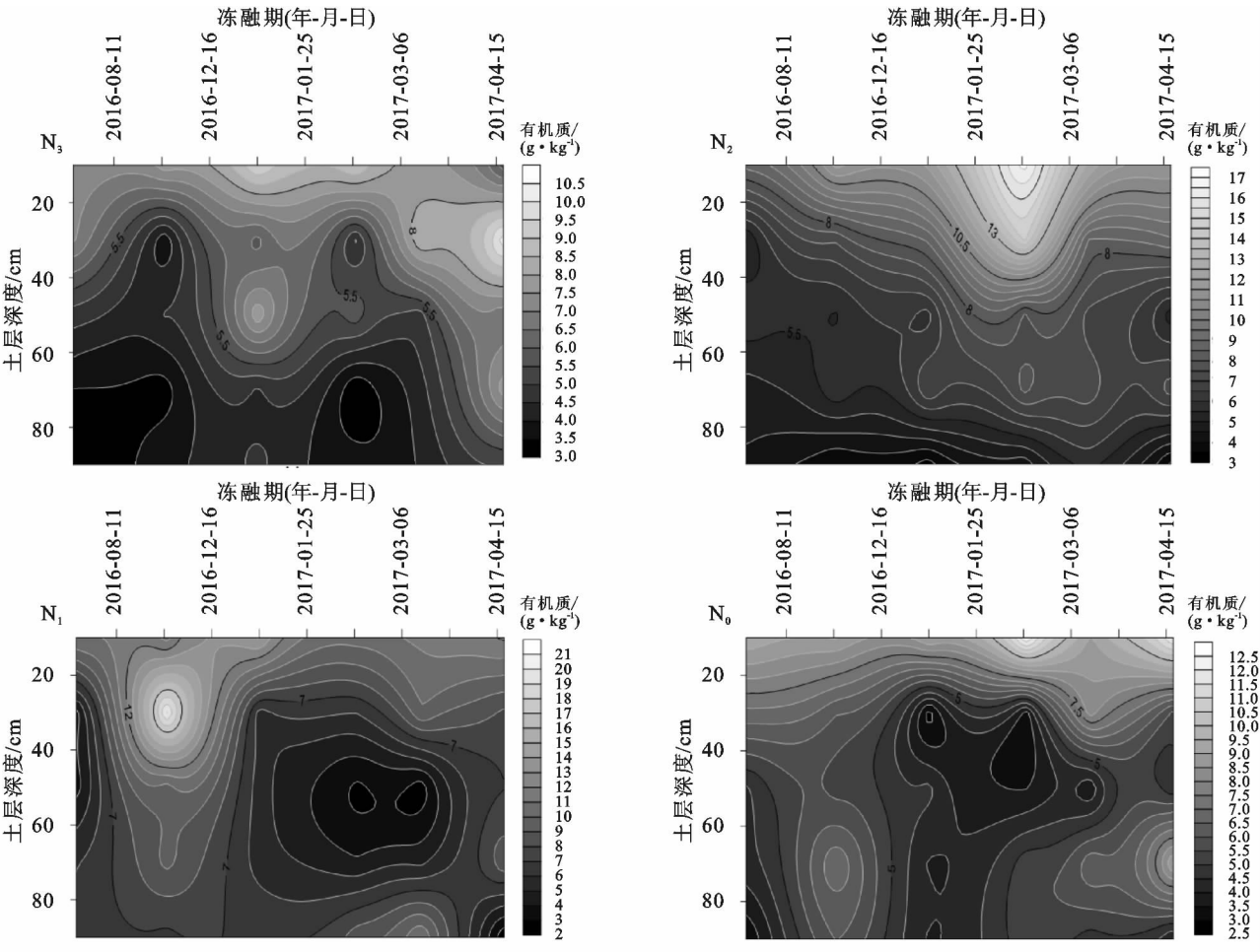


图 8 冻融期有机质含量变化

表 2 春播前耕层(0—40 cm)土壤水、盐、养分含量

处理	土壤 含水率/%	土壤 含盐率/%	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
N ₃	21.50a	0.45a	0.67d	20.40d	5.69d
N ₂	20.09b	0.19b	1.26b	35.23b	13.34a
N ₁	20.17b	0.17c	1.63a	40.79a	12.19b
N ₀	20.27b	0.14d	1.00c	33.37c	11.49c

注:表中数字后同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4 春播前土壤肥力综合评价分析

2.4.1 不同施肥量下各土壤肥力因子相关性分析

采用 Pearson 相关性分析法得出各肥力因子相关系数矩阵

表 3 各肥力因子相关系数矩阵

肥力因子	θ_m	AN	AP	AK	TN	TP	TK	OM	LOC	S_i
θ_m	1.00									
AN	0.89**	1.00								
AP	0.88**	0.76	1.00							
AK	0.80*	0.78	1.00**	1.00						
TN	0.99**	0.90	0.78	0.83	1.00					
TP	0.68	0.97	0.65	0.65	0.78	1.00				
TK	0.73	0.26	0.59	0.65	0.63	0.04	1.00			
OM	0.75*	0.94**	0.51	0.53	0.83**	0.95**	0.09	1.00		
LOC	0.75*	0.94**	0.51	0.53	0.83**	0.95**	0.09	1.00**	1.00	
S_i	-0.99**	-0.76	-0.78	-0.84	-0.96**	-0.60	-0.82	-0.65	-0.65	1.00

注: * 表示 0.05 水平上显著相关; ** 表示 0.01 水平上显著相关; θ_m 表示土壤含水率; AN 表示碱解氮; AP 表示速效磷; AK 表示速效钾; TN 表示全氮; TP 表示全磷; TK 表示全钾; OM 表示有机质; LOC 表示有机碳; S_i 表示土壤含盐率。

阵。从表 3 可以看出,土壤含盐率与其他肥力因子间存在负相关关系,说明土壤含盐率严重影响土壤培肥能力。土壤有机碳与土壤全氮、碱解氮、速效磷、有机质肥力指标间存在显著的正相关关系,表明土壤有机碳库是土壤培肥的基础。全钾含量与其他肥力间相关性不显著,由于该试验区土壤中全钾含量是其他肥力因子含量的 30 倍左右,属于富钾土壤,所以不能单凭借某个肥力因子来科学评价春播前土壤肥力。本研究通过对土壤 10 个肥力指标进行主成分分析,来评价耕作期施肥不同经过冻融期后春播前土壤的肥力,为灌区长期的发展提供施肥量的参考意义。

2.4.2 春播前土壤肥力指标的主成分分析 经主成分分析得出各主成分的特征值和方差贡献率(表 4),当主成分的累计贡献率大于 85%时,可用来反映系统的变异信息^[24]。从上述的 10 种土壤肥力因子中的主成分 1 和主成分 2 的累计方差贡献率达到 94.07%,可以用来反映春播前土壤各肥力因子的变异情况。从表 4 还可以看出,各成分评价土壤的肥力的影响力为主成分 1(PC1)>主成分 2(PC2)。

表 4 主成分分析的特征根与方差贡献率

主成分	特征根	贡献率/%	累计贡献率%
主成分 1	7.59	75.90	75.90
主成分 2	1.82	18.17	94.07

一般认为因子负荷越大,变量在相应主成分中的权重就越大^[25]。由图 9 可知,在 PC1 上,除了土壤含盐率其他因子都为正,且全氮与碱解氮有较高的因子,全钾与速效钾因子负荷偏低。有机碳、有机质、全磷、碱解氮在 PC2 上有较高的因子负荷。

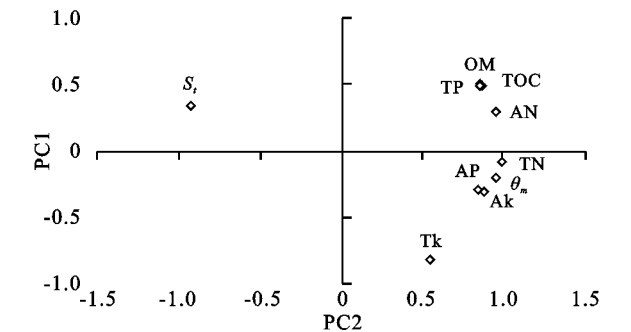


图 9 土壤肥力因子在 PC1 与 PC2 的因子负荷分布

由以上的分析可知,对于春播前土壤肥力来说,绝大部分因子除去土壤含盐率和全钾)有较高负荷,表明用这 2 个主成分就可以反映由上述肥力指标所表征的土壤肥力水平。根据分析所得的各变量在相应主成分上的因子负荷,可分别获得各主成分的函数表达式:

$PC1 = 0.345\theta_m + 0.346AN + 0.305AP + 0.317AK + 0.357TN + 0.311TP + 0.196TK + 0.31OM + 0.31LOC - 0.334S_e$ (1)

$PC2 = -0.148\theta_m - 0.212AN - 0.212AP - 0.234AK - 0.06TN - 0.361TP - 0.603TK + 0.369OM + 0.368LOC + 0.253S_e$ (2)

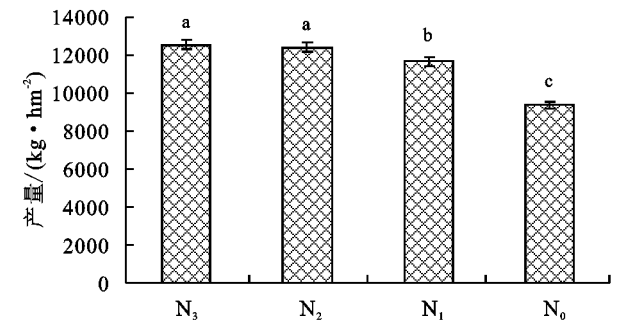
将各土壤肥力指标标准化后代入函数表达式中,得出各自主成分的得分情况,再根据主成分函数模型 $F = \sum b_j z_j$ ^[26] 计算各处理在 2 个主成分上的得分(表 5)。

从综合得分情况可以得出,在玉米生育期施不同氮肥量农田经过秋浇,经过冻融作用后翌年春播前土壤肥力的变化情况,得分情况为: $N_3 < N_0 < N_1 < N_2$,高氮处理的土壤肥力低下,由于该处理土壤次生盐碱化严重,严重影响土壤的潜在肥力;中氮处理得分最

高,土壤肥力最好,对翌年春播土壤环境肥力较高;低氮处理供应能力相对中氮处理偏低。由图 10 可知,高氮与中氮产量差异不显著,土壤经过复杂的冻融循环过程,春播前呈现出中氮处理的土壤肥力远高于高氮处理。为了农业的持续发展及翌年春播前土壤供肥能力的提高,使农田高效循环利用,该地区在玉米生育期内施氮肥量为 225 kg/hm²。

表 5 各处理因子、主成分与综合得分

处理	因子 1	因子 2	PC1 得分	PC2 得分	综合得分
N ₃	-1.22346	-0.85431	-3.369690	-1.15152	-2.94
N ₂	1.21511	-0.79510	3.346693	-1.07171	2.49
N ₁	0.11955	0.45208	0.329268	0.60935	0.38
N ₀	-0.11119	1.19733	-0.306240	1.61387	0.06



注:图中不同字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 10 生育期内不同施氮量对玉米产量的影响

3 结论

(1)冻融期内,土壤水分、盐分重新进行分布。秋浇后,土壤含水率显著高于秋浇前,表层土壤含水率显著增加,冻结期内,水分向表层积聚,土壤含水率的 C_e 值达 43%,随着温度降低水分自表层向深层(80—100 cm)冻结,各处理间土壤含水率无明显差异,春播前,各处理土壤墒情均满足作物生长的需求;在秋浇后,大量盐分被淋洗,在冻融后期,盐分随着水分向冻结层迁移,在通融期,盐分受到融冻水的下渗和蒸发共同作用,使得各处理表层含盐率降幅为 7%~32%。高氮处理的土壤肥力低下,该处理土壤次生盐碱化严重,严重影响土壤的潜在肥力。

(2)冻融期内土壤养分主要集中在表层 0—20 cm,平均高于深层土壤冻融期,土壤中的全氮、有机质含量在冻融期内呈现先增大后减小的变化规律,最大值出现在最大冻深期,说明冻结作用有助于全氮、碱解氮以及有机质养分的积累。

(3)运用主成分分析对春播前土壤肥力进行综合评价,得出在 PC1 和 PC2 上有机质、有机碳以及全磷有较高的因子负荷,对土壤肥力的贡献率相对较高。从综合得分情况来看,表现为: $N_3 < N_0 < N_1 < N_2$,高氮处理的土壤肥力低下,中氮处理得分最高,土壤肥力最佳,翌年

春播土壤供肥能力最高,为了农业持续发展,推荐该地区玉米生育期内施氮肥量为 225 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 石元亮,王玲莉,刘世彬,等. 中国化学肥料发展及其对农业的作用[J]. 土壤学报,2008,45(5):852-864.
- [2] 黄小红,张磷,肖妙玲. 施肥制度对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(13):200-206.
- [3] 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 of USA,2009,106:3041-3046.
- [4] 郭富强. 内蒙古河套灌区农田退水氮磷迁移特征及最优施肥模式研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [5] 郭鹏飞,张筱茜,韩文,等. 滴灌频率和施氮量对温室西葫芦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(4):109-114.
- [6] Li J M, Inanaga S, Li Z H, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management,2005,76(1):8-23.
- [7] 袁嫚嫚,邹刚,孙义祥,等. 缓释尿素对两种土壤小麦氮素运转、产量和土壤无机氮的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(4):233-239.
- [8] 肖新,储祥林,邓艳萍. 江淮丘陵季节性干旱区灌溉与施氮量对土壤肥力和水稻水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(1):84-88.
- [9] Gouranga K, Verma H N, Ravender S. Effects of winter crop and supplemental irrigation on crop yield, water use efficiency and profitability in rain fed rice based cropping system of eastern India[J]. Agricultural Water Management,2006,79(3):280-292.
- [10] Zhang B C, Huang G B, Li F M. Effect of limited single irrigation on yield of winter wheat and spring maize relay inter cropping[J]. Pedosphere,2007,17(4):529-537.
- [11] 陈欢,曹承富,张存岭. 基于主成分—聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J]. 土壤学报,2014,51(3):609-617.
- [12] 张瑞芳,王瑄,范昊明. 我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):24-28.
- [13] 罗亚晨,吕瑜良,杨浩. 冻融作用下寒温带针叶林土壤碳氮矿化过程研究[J]. 生态环境学报,2014,23(11):1769-1775.
- [14] 包耀贤,徐明岗,吕粉桃. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学,2012,45(20):4197-4204.
- [15] 吴玉红,田霄鸿,同延安. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志,2010,29(1):173-180.
- [16] 王增丽,冯浩,余坤. 基于主成分分析的不同预处理麦秸改良土壤效果评价[J]. 农业机械学报,2016,47(10):150-155.
- [17] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry,2007,39:977-986.
- [18] 刘建鹏. 台安县稻田养分含量现状及改良建议[J]. 现代农业,2010(4):42-43.
- [19] 齐智娟. 河套灌区盐碱地玉米膜下滴灌土壤水盐热运移规律及模拟研究[D]. 陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.
- [20] 王伦平,陈亚新,曹国芳,等. 内蒙古河套灌区灌溉排水与盐渍化防治[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
- [21] 邴慧,马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. 冰川冻土,2011,33(5):1106-1113.
- [22] 梁建财,史海滨,李瑞平. 秸秆覆盖秋浇后盐渍土壤冻融过程及水盐运移特征[J]. 水土保持学报,2017,31(5):145-151.
- [23] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. 水利学报,2009,40(4):403-412.
- [24] 梁建财,李瑞平,史海滨. 河套灌区覆盖对盐渍土壤养分迁移与分布的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(2):113-121.
- [25] 陈吉,赵炳梓,张佳宝. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J]. 土壤,2010,42(3):415-420.
- [26] 孙刘平,钱吴永. 基于主成分分析法的综合评价方法的改进[J]. 数学的实践与认识,2009,39(18):15-20.
- [27] 势预测及其防治对策[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):57-71.
- [29] 张平仓,唐克丽,郑粉丽,等. 皇甫川流域泥沙来源及其数量分析[J]. 水土保持学报,1990,4(4):29-36.
- [30] Zhao G, Mu X, Han M, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau[J]. Catena,2017,149:110-119.

(上接第 145 页)

- [25] 杨明义,田均良,刘普灵. 应用¹³⁷Cs 研究小流域泥沙来源[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(3):49-53.
- [26] 俞劲炎,卢升高. 土壤磁学[M]. 南昌:江西科学技术出版社,1990:52-62.
- [27] 卢升高. 中国土壤磁性与环境[M]. 1 版. 北京:高等教育出版社,2003:48-56.
- [28] 周佩华,李银锄,黄义端,等. 2000 年中国水土流失趋