

DOI: 10.5846/stxb201907071424

张鑫,李菁园,孟凡乔,吴文良,李洪波,胡正江.桓台县冬小麦和夏玉米秸秆长期还田的生态效益分析.生态学报,2020,40(12):4157-4168.

Zhang X, Li J Y, Meng F Q, Wu W L, Li H B, Hu Z J. Ecological impacts of winter wheat and summer maize straw incorporation in Huantai County, Shandong Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4157-4168.

桓台县冬小麦和夏玉米秸秆长期还田的生态效益分析

张 鑫^{1,2}, 李菁园², 孟凡乔^{2,*}, 吴文良², 李洪波³, 胡正江³

1 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071000

2 中国农业大学资源与环境学院农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193

3 山东省桓台县农业局, 淄博 256400

摘要:山东省桓台县作为江北第一个“吨粮县”, 1980 年以来农业集约化得到了快速发展。随着燃料需求的减少以及畜牧养殖与作物生产的分离, 作物秸秆处理已日益成为当地农民和技术人员面临的巨大挑战。该地区冬小麦和夏玉米秸秆从 1980 年开始, 还田比例逐步增加, 到 2010 年两季秸秆接近全部还田。我们查阅年鉴数据, 结合长期定位试验, 收集相关数据计算和分析桓台地区 1980—2014 年期间的作物和秸秆产量、秸秆养分含量、土壤养分及有机碳状况、温室气体排放和氮淋溶等, 并对秸秆还田的农田生态效应进行系统评估。研究发现, 到 2014 年, 两季秸秆还田对 N、P、K 养分的贡献率(即还田秸秆养分量与还田秸秆和肥料养分总量的比值)分别为 19.3%、15.8% 和 59.8%。随着秸秆还田量的增加, 土壤有机碳(SOC, 0—20 cm)含量从(7.8±1.6) g/kg(1980 年)增加到(11.0±2.3) g/kg(2014 年), 土壤碱解氮、速效磷和速效钾分别提高了 134.0%、138.5% 和 62.2%。秸秆还田可以降低农田氮素损失, 2010 年代全县县域内减少温室气体排放量为 24528 Mg CO₂-eq a⁻¹, 氨挥发和氮淋溶分别减少 156.4 Mg N hm⁻² 和 287.4 Mg N hm⁻²。综上, 秸秆还田能显著改善农学和环境效益, 提高土壤固碳减排潜力, 降低氮素投入量并减少氮素损失。今后农业生产中, 在直接还田基础上, 秸秆综合利用可以进一步优化(如进行堆肥或替代畜牧饲料等), 从而增加秸秆还田的经济和环境效应。

关键词: 秸秆还田; 集约化农业; 土壤有机碳; 温室气体; 养分; 生态效应

Ecological impacts of winter wheat and summer maize straw incorporation in Huantai County, Shandong Province

ZHANG Xin^{1,2}, LI Jingyuan², MENG Fanqiao^{2,*}, WU Wenliang², LI Hongbo³, HU Zhengjiang³

1 College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China

2 Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, Beijing 100193, China

3 Agricultural Bureau of Huantai County, Shandong Province, Zibo 256400, China

Abstract: Huantai was the first county in northern China which achieved an average grain yield of 15 t/hm² from 1990, and has experienced a rapid agricultural intensification process since 1980s. Crop straw management has been an increasing challenge for local farmers and technicians as fuel demand decreased and uncoupling of animal husbandry with crop production. Huantai county initiated the program of crop straw incorporation to cropland since 1980s and by the 2010s, 100% of crop straw had been recycled. We collected crop production within the period of 1980—2014, and the corresponding parameters of straw and soil nutrients and soil organic carbon (SOC) contents, greenhouse gas (GHG) emissions and nitrogen (N) leaching, to quantify the ecological impacts of crop straw incorporation. The study found that crop straw incorporation contribution increased to 19.3%, 15.8% and 59.8% of N, phosphorous (P), and potassium (K)

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目(2016YFD0800104, 2017YFD0800605); 河北农业大学引进人才科研专项(YJ201949)

收稿日期: 2019-07-07; **修订日期:** 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mengfq@cau.edu.cn

in total nutrients input (chemical fertilizer+straw) in 2014, respectively. In 2014, the SOC content (0—20 cm) for the whole county increased from 7.8 ± 1.6 g/kg to 11.0 ± 2.3 g/kg; meanwhile, soil available N, available P and available K increased by 134.0%, 138.5% and 62.2%, respectively, compared with that of 1982. During 2010s, global warming potential of N_2O , ammonia volatilization and N leaching were reduced at $24528 \text{ Mg CO}_2\text{-eq a}^{-1}$, $156.4 \text{ Mg N hm}^{-2}$ and $287.4 \text{ Mg N hm}^{-2}$, respectively. In the future, besides direct incorporation, other measures such as compost and replacement of animal husbandry feedstuffs, maybe introduced to further improve the economic and environmental benefits of straw incorporation.

Key Words: straw incorporation; intensive agriculture; soil organic carbon; greenhouse gas; nutrients; ecological impacts

中国作为世界农业大国,自 20 世纪 80 年代以来,随着农业集约化生产的逐步推广,每年产生大量的作物秸秆^[1],研究表明我国 2015 年农作物秸秆产量达到了约 9.3 亿 $\text{t}^{[2]}$ 。秸秆处理已经成为诸多国家(如英国、墨西哥)所面临的巨大挑战^[3]。在中国,20 世纪 90 年代以来秸秆处理的主要方式是就地焚烧,而随着秸秆禁烧政策的实施,秸秆还田逐渐成为中国乃至其他国家最简单和直接的处理和利用方式^[4-5]。

国内外大量研究发现,在各种农田管理措施中,作物秸秆作为外源有机碳,还田后能增加土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量^[4],促进土壤微生物对有机质的分解和腐殖化,补给土壤养分^[6],改善和维持土壤结构稳定^[7],增加土壤持水量^[8],降低农田养分淋失^[9-10]。长期秸秆还田不仅能提高作物产量,还能维持土壤养分含量的稳定^[11]。也有学者认为,秸秆还田会增加杂草和虫害发生率及播种难度^[12],增加土壤微生物对土壤 O_2 和养分的消耗,可能增加反硝化细菌活性而增加 N_2O 排放,还能降低作物根系对土壤养分的吸收和利用,降低氮素利用效率^[13]。因此,对区域长期秸秆还田的农学和生态环境效应研究,可以为农业生产措施的制定提供科学依据。

华北平原是我国冬小麦和夏玉米的主要种植区域,也是作物秸秆的主要来源。80 年代以来,高产品种的引入、化肥和灌溉水的过量投入以及频繁耕作等措施推进了该地区的农业集约化过程^[14],提高了粮食产量,使得桓台县成为了江北地区第一个吨粮县^[15],全县冬小麦和夏玉米秸秆年产量达到了 16 Mg/hm^2 。虽然 Liao, 等^[15]的研究表明该地区长期秸秆还田会增加土壤 SOC 含量,但目前为止并没有对该地区秸秆还田的生态效应进行系统全面的评价。我们对桓台县 30 多年以来,作物秸秆还田的演变及其对作物生产和土壤性状的影响进行系统分析,旨在为我国诸多集约化农业地区乃至其他国家秸秆资源进行合理利用和决策提供技术和管理支持。

1 研究区概况

本研究对象为山东省桓台县(东经 $117^\circ 50' - 118^\circ 10'$, 北纬 $36^\circ 54' - 37^\circ 04'$)(图 1)。该地区地形属山前洪积平原和黄淮海平原的叠错地带,属典型的平原地区。桓台县地属暖温带大陆季风气候区,四季分明、气候温和、阳光资源丰富、降水不均、冬春干旱、夏季多雨。年平均气温 12.5°C , 年平均降水量 540.7 mm , 年日照时数 2833 h , 年无霜期平均为 $198 \text{ d}^{[15-16]}$ 。自 20 世纪 80 年代以来,桓台县主要的作物种植制度为冬小麦(*Triticum aestivum* L.)-夏玉米(*Zea mays* L.)轮作,一年两熟,冬小麦与每年 10 月中旬播种并于次年 6 月上旬收获,夏玉米于每年 6 月中下旬播种并同年 10 月上旬收获。随着化肥、农药和灌溉水量的持续增加以作物品

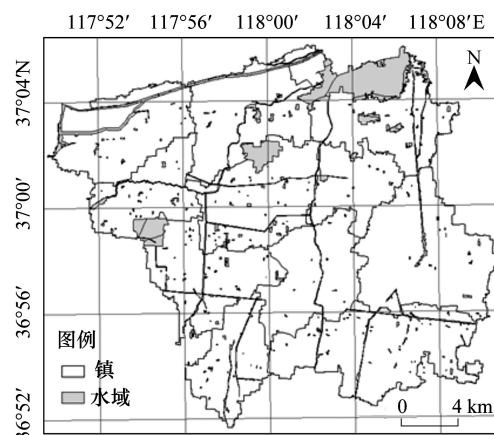


图 1 研究区图

Fig.1 Map of study area

种和种植方式的不断优化,该地区粮食产量快速提升,1990 年成为长江以北全国第一个吨粮县,其粮食生产在山东省乃至全国占有重要的地位。2016 年全县冬小麦和夏玉米总产分别为 19.2 万吨(8.2 Mg/hm^2)和 18.4 万吨($7.98.2 \text{ Mg/hm}^2$)(2017 年淄博市统计年鉴)^[17]。全县土壤类型包括潮土和褐土,土壤质地以壤土为主。

2 研究方法

2.1 第二次全国土壤普查

第二次土壤普查(the Second National Soil Survey)是在全国范围内于 1981—1983 年开展的土壤普查工作,桓台县在 1982 年 8 月—1983 年 8 月进行,历时一年完成^[18]。该次土壤有机质测试采用重铬酸钾容量法,主要普查结果汇编于《桓台县土壤志》中。本研究采用其中 258 个样点的表层土壤,其有机质数据作为桓台县 1982 年土壤碳库的基线数据。

2.2 历年土壤肥力监测数据

历年桓台县土壤肥力监测数据由桓台县农业局提供。自 1987 年开展至今,当地农业局开展配方施肥和土壤肥力监测,即在每年 9 月夏玉米收获后对农田耕层土壤(0—20 cm)采样测试,每 $6.67\text{—}33.33 \text{ hm}^2$ 采集一个混合样。本研究获得了其 2011 年以前的各年 pH、有机质和养分监测数据,其中 1983—1986 年、2000—2001 年、2004—2005 年因土壤肥力调查工作中断因而无详细的数据,另外 2010 年也无详细监测数据,这些年份数据按照内插法计算得出。2011 年 9 月在全县范围内对农田土壤采样调查,采用 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的尺度均匀布点,每个样点的土壤由 3 个采集点的土壤混合而成,采样层次为 0—20 cm 土层,本研究采用其中 123 个样点作为 2011 年的土壤数据,各样点以 GPS 精确定位并逐年采样测定,2012—2014 年土壤样品取自于桓台长期定位实验区。所采集土壤样品风干,磨土过 0.25 mm 筛,封于自封袋中于温室保存以备测定。土壤样品中的速效养分均采用常规方法进行测定:碱解氮、速效磷和速效钾分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法和乙酸铵浸提-火焰光度法,土壤有机碳和全氮含量用碳氮元素分析仪进行测定(Thermo Flash EA 1112)。

2.3 气候、化肥与产量数据

1980—2014 年的气象数据(年均气温和年均降水量)由桓台县气象局提供;1980—2014 年的耕地面积、小麦和玉米籽粒和秸秆产量、化肥投入情况以及秸秆还田比例等数据来自桓台县统计年鉴。

2.4 土壤有机碳储量

1980—2010 年的土壤有机质数据按照转化系数可以直接获得土壤有机碳含量,即,

$$Q_{\text{SOC}} = Q_{\text{SOM}} / 1.724$$

土壤有机碳储量按照以下公式计算:

$$\Delta\text{SOC} = Q_{\text{SOC}} \times \rho \times 0.2 \times 10^4$$

其中, ΔSOC 为 0—20 cm 土壤有机碳储量(kg C hm^{-2}), Q_{SOC} 为 0—20 cm 土壤有机碳含量(g/kg), ρ 为 0—20 cm 土壤密度(g/cm^3),0.2 为土壤深度(m), 10^4 为转化系数。

2.5 秸秆养分含量

不同施肥量条件下冬小麦和夏玉米秸秆氮含量通过以下公式计算^[19]:

冬小麦秸秆氮与施肥量:

$$y = -0.48x^2 + 1.91x + 4.54$$

夏玉米秸秆氮与施肥量:

$$y = -0.22x^2 + 1.21x + 5.31$$

其中, y 为氮含量,单位为 g/kg ; x 氮肥施用量,单位为 $\times 100 \text{ kg N hm}^{-2}$ 。小麦和玉米秸秆中的磷含量和钾含量分别参考《中国农作物主要施肥指南》。

秸秆对养分贡献率定义为为还田秸秆养分量与还田秸秆和肥料养分总量的比值(秸秆还田养分量/(秸秆还田养分量+施肥养分量))。

2.6 CO₂当量的计算

作物施肥后的活性氮损失包括 N₂O、NH₃和氮淋溶三种主要途径,通过 Yan 等^[20]的研究表明,N₂O 的直接排放系数为 0.5%,而通过对 NH₃与施氮量之间的拟合关系研究可知^[19],NH₃与施氮量的关系在冬小麦季和夏玉米季分别为: $y=0.11x-2.63$ (冬小麦)和 $y=0.16x-8.10$ (夏玉米),由 Cui 等^[21]的研究发现,氮淋溶与施氮量的关系分别为 $y=2.7e^{0.0088x}$ (冬小麦季), $y=4.46e^{0.0094x}$ (夏玉米季),基于以上研究结果和每年施氮量分别计算每年 N₂O、NH₃和氮淋溶损失量。

在 100 年的尺度下,N₂O 的增温效应是 CO₂的 298 倍^[22],计算公式为:

$$GWP_{N_2O} = \frac{N_2O}{28} \times 44 \times 298$$

其中,GWP(Global Warming Potential)(kg CO₂-eq hm⁻² a⁻¹)为 N₂O 的净温室效应,28 和 44 分别是 N₂O 中 N 和 N₂O 的摩尔质量。

间接温室气体排放系数:根据 Smith 等^[16]的研究可知,氮、磷、钾肥的间接温室气体排放系数分别为 8.3 kg CO₂-eq kg⁻¹ N, 0.59 kg CO₂-eq kg⁻¹ P₂O₅和 0.47 kg CO₂-eq kg⁻¹ K₂O。

2.7 数据处理与分析

所有数据的前期处理和作图均使用 Microsoft Excel (2016)进行,所有数据通过 SPSS Statics 22.0 软件 (SPSS inc., Chicago, USA)进行相关性分析和多元回归分析,多重比较采用最小显著差异法 (LSD) 检验 (5% 水平)。

3 结果与分析

3.1 1980—2014 年桓台县冬小麦-夏玉米秸秆还田情况

从 1980 年至 2014 年,桓台县农业逐步向可持续集约化农业方向发展。到 1995 年,小麦秸秆已全量还田;到 2008 年,玉米秸秆全量还田(表 1、表 2)。

表 1 1980—2014 年间桓台县冬小麦季生产通过夏玉米秸秆还田带入的养分数量和养分贡献率

Table 1 Nutrients returned to the cropland due to maize straw incorporation and contribution to wheat grain production in wheat season from 1980 to 2014 in Huantai County

年份 Year	玉米秸秆量 Maize straw/ (kg/hm ²)	还田比例 Incorporation rate/%	秸秆还田养分贡献量 Contribution amount/ (kg/hm ²)			施肥量 Fertilizer applied/ (kg/hm ²)			秸秆还田养分贡献率 Contribution rate/%		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K
1980	4246	1	0.3	0.1	0.5	147	26.6	2.9	0.2	0.2	14.0
1981	3667	3	0.8	0.1	1.2	152	31.1	4.4	0.5	0.5	21.7
1982	3272	5	1.2	0.2	1.8	186	32.0	5.1	0.6	0.7	26.3
1983	3466	8	2.0	0.4	3.1	194	28.6	6.3	1.0	1.3	32.8
1984	4176	11	3.2	0.6	5.1	229	27.5	8.4	1.4	2.2	37.8
1985	4034	14	4.0	0.8	6.3	220	27.1	9.9	1.8	2.7	38.8
1986	4112	16	4.6	0.9	7.3	216	33.0	15.5	2.1	2.6	32.0
1987	4503	17	5.4	1.0	8.5	212	34.2	15.1	2.5	2.9	36.0
1988	5509	17	6.5	1.2	10.1	199	30.4	20.1	3.1	3.8	33.5
1989	6080	21	8.8	1.7	13.9	225	33.7	24.2	3.7	4.7	36.5
1990	8684	21	12.2	2.4	20.4	266	44.8	46.8	4.4	5.2	30.3
1991	8629	24	13.6	2.7	22.8	269	48.2	62.5	4.8	5.4	26.8
1992	7895	24	12.4	2.5	21.0	273	51.8	51.8	4.4	4.6	28.9
1993	7925	25	12.5	2.6	21.7	287	56.2	54.4	4.2	4.4	28.5
1994	8192	29	16.2	3.2	26.4	245	46.8	68.1	6.2	6.3	27.9

年份 Year	玉米秸秆量 Maize straw/ (kg/hm ²)	还田比例 Incorporation rate/%	秸秆还田养分贡献量 Contribution amount/ (kg/hm ²)			施肥量 Fertilizer applied/ (kg/hm ²)			秸秆还田养分贡献率 Contribution rate/%		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K
1995	8757	27	15.7	3.1	26.2	265	41.9	54.1	5.6	7.0	32.7
1996	8283	20	11.3	2.2	18.4	249	54.3	69.7	4.3	3.9	20.9
1997	6316	16	6.9	1.4	11.4	257	53.9	74.4	2.6	2.5	13.3
1998	8584	20	11.5	2.3	19.1	259	50.2	78.2	4.3	4.4	19.6
1999	8892	27	16.6	3.2	26.6	237	46.5	68.0	6.5	6.4	28.1
2000	8369	22	12.9	2.4	20.4	222	46.2	79.9	5.5	5.0	20.4
2001	9043	23	14.6	2.8	23.1	213	45.7	76.2	6.4	5.7	23.3
2002	8852	24	15.0	2.8	23.6	199	50.1	75.5	7.0	5.3	23.8
2003	8054	30	16.7	3.2	26.8	237	49.0	71.0	6.6	6.2	27.4
2004	8998	30	18.3	3.6	30.0	252	51.8	78.0	6.8	6.5	27.8
2005	8942	50	31.4	5.9	49.6	219	40.2	73.5	12.5	12.9	40.3
2006	8927	50	31.3	5.9	49.5	217	37.8	70.5	12.6	13.6	41.3
2007	8988	70	42.6	8.4	69.8	253	41.8	65.5	14.4	16.7	51.6
2008	8981	90	54.7	10.8	89.7	253	49.2	55.5	17.8	17.9	61.8
2009	9027	90	54.6	10.8	90.2	259	40.5	49.5	17.4	21.1	64.6
2010	8850	90	54.6	10.6	88.4	243	36.0	45.5	18.4	22.7	66.0
2011	9104	90	55.7	10.9	90.9	250	37.1	48.5	18.2	22.7	65.2
2012	9121	90	57.9	10.9	91.1	245	41.2	51.2	19.1	20.9	64.0
2013	8291	90	52.7	9.9	82.8	240	39.1	52.0	18.0	20.2	61.4
2014	8570	90	54.3	10.3	85.6	239	40.7	51.5	18.5	20.1	62.4

表 2 1980—2014 年间桓台县夏玉米季生产通过冬小麦秸秆还田带入农田养分数量和养分贡献率

Table 2 Nutrients returned to the cropland due to wheat straw incorporation and contribution to maize grain production in maize season from 1980 to 2014 in Huantai County

年份 Year	小麦秸秆量 Wheat straw/ (kg/hm ²)	还田比例 Incorporation rate/%	秸秆还田养分贡献量 Contribution amount/ (kg/hm ²)			施肥量 Fertilizer applied/ (kg/hm ²)			秸秆还田养分贡献率 Contribution rate/%		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K
1980	4098	1	0.3	0.0	0.4	147	26.6	2.9	0.2	0.1	12.0
1981	4736	3	0.9	0.1	1.4	152	31.1	4.4	0.6	0.3	23.7
1982	4093	5	1.4	0.1	2.0	186	32.0	5.1	0.7	0.5	27.9
1983	4623	8	2.5	0.3	3.6	194	28.6	6.3	1.2	0.9	36.1
1984	5080	11	3.7	0.4	5.4	229	27.5	8.4	1.6	1.4	39.0
1985	5159	14	4.8	0.5	6.9	220	27.1	9.9	2.1	1.9	41.2
1986	5206	16	5.5	0.6	8.0	216	33.0	15.5	2.5	1.8	34.1
1987	4924	18	5.9	0.6	8.5	212	34.2	15.1	2.7	1.8	36.1
1988	6069	20	8.0	0.9	11.7	199	30.4	20.1	3.9	2.8	36.8
1989	6030	30	11.9	1.3	17.4	225	33.7	24.2	5.0	3.7	41.8
1990	6725	40	17.2	1.9	25.9	266	44.8	46.8	6.1	4.1	35.6
1991	7270	50	23.2	2.6	35.0	269	48.2	62.5	7.9	5.1	35.9
1992	8195	60	31.3	3.5	47.3	273	51.8	51.8	10.3	6.3	47.7
1993	7929	70	34.6	3.9	53.4	287	56.2	54.4	10.8	6.6	49.5
1994	8260	80	43.1	4.7	63.6	245	46.8	68.1	15.0	9.1	48.3
1995	7893	90	45.6	5.0	68.4	265	41.9	54.1	14.7	10.7	55.8
1996	8183	90	48.0	5.2	70.9	249	54.3	69.7	16.2	8.8	50.4

续表

年份 Year	小麦秸秆量 Wheat straw/ (kg/hm ²)	还田比例 Incorporation rate/%	秸秆还田养分贡献量 Contribution amount/ (kg/hm ²)			施肥量 Fertilizer applied/ (kg/hm ²)			秸秆还田养分贡献率 Contribution rate/%		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K
1997	8464	90	49.3	5.4	73.3	257	53.9	74.4	16.1	9.1	49.6
1998	8382	90	48.7	5.4	72.6	259	50.2	78.2	15.8	9.6	48.1
1999	8498	90	50.2	5.4	73.6	237	46.5	68.0	17.5	10.5	52.0
2000	8630	90	51.4	5.5	74.7	222	46.2	79.9	18.8	10.7	48.3
2001	7747	90	46.2	5.0	67.1	213	45.7	76.2	17.8	9.8	46.8
2002	7318	90	43.7	4.7	63.4	199	50.1	75.5	18.0	8.5	45.6
2003	7518	90	44.4	4.8	65.1	237	49.0	71.0	15.8	8.9	47.8
2004	7825	90	45.8	5.0	67.8	252	51.8	78.0	15.4	8.8	46.5
2005	7948	90	47.3	5.1	68.8	219	40.2	73.5	17.8	11.2	48.4
2006	8414	90	50.1	5.4	72.9	217	37.8	70.5	18.8	12.5	50.8
2007	8401	90	49.1	5.4	72.8	253	41.8	65.5	16.3	11.4	52.6
2008	8346	90	48.8	5.3	72.3	253	49.2	55.5	16.2	9.8	56.6
2009	6299	90	36.6	4.0	54.5	259	40.5	49.5	12.4	9.0	52.4
2010	8238	90	48.5	5.3	71.3	243	36.0	45.5	16.6	12.8	61.1
2011	8697	90	50.9	5.6	75.3	250	37.1	48.5	16.9	13.0	60.8
2012	8730	90	52.1	5.6	75.6	208	41.2	84.8	17.5	11.9	59.2
2013	8047	90	48.0	5.1	69.7	205	39.1	84.9	16.7	11.6	57.5
2014	8173	90	48.7	5.2	70.8	212	40.7	86.8	20.0	11.4	57.1

秸秆还田能显著增加 N、P、K 养分输入。在冬小麦季,夏玉米秸秆还田所贡献的 N、P、K 量先呈缓慢增加趋势,自 2005 年后分别迅速增加并稳定到 54.3 kg N hm⁻²、10.3 kg P hm⁻²、85.6 kg K hm⁻²(2014 年),且秸秆还田对 N、P、K 养分的贡献率分别达到 18.5%、20.1%和 62.4%(表 1);在夏玉米季,到 2014 年,冬小麦秸秆还田所贡献的 N、P、K 分别为 48.7 kg N hm⁻²、5.2 kg P hm⁻²和 70.8 kg K hm⁻²,分别占全部养分来源的 20%、11%和 57%(表 2)。在县域尺度上,2010—2014 年期间小麦和玉米秸秆还田对养分的贡献量达到了 2604 Mg N a⁻¹、417 Mg P a⁻¹(955 Mg P₂O₅ a⁻¹)和 4166 Mg K (5020 Mg K₂O a⁻¹)。

3.2 秸秆还田对土壤速效养分的影响

从 1982 年到 2014 年,桓台县土壤养分含量呈增加趋势(图 2):其中土壤碱解氮由 54.7 mg/kg 增至 128 mg/kg(增加 134.0%),速效磷由 10.9 mg/kg 增至 26 mg/kg(增加 138.5%),速效钾由 141.8 mg/kg 增至 230 mg/kg(增加 62.2%)(图 2)。通过多元回归分析可知,秸秆还田是影响土壤养分含量的主要因素(图 3),尤其是速效氮和速效钾的含量与秸秆还田呈极显著相关性。

对土壤碱解氮、速效磷、速效钾和秸秆贡献的氮、磷、钾进行拟合分析(图 3),线性回归方程分别为 $y = 0.5214x + 41.227$ (N; $R^2 = 0.66$, $P < 0.01$), $y = 0.9661x + 15.236$ (P; $R^2 = 0.51$, $P < 0.01$), $y = 0.893x + 32.336$ (K; $R^2 = 0.62$, $P < 0.01$)。秸秆还田贡献的养分与土壤养分成显著正相关。由土壤速效养分和肥料带入养分之间的拟合分析可知(图 3d—f),氮肥和钾肥施用量对土壤速效养分影响不相关($P = 0.308$, $P = 0.317$),磷肥施用量对土壤速效磷达到了极显著性水平($y = -0.0128x^2 + 2.4414x - 88.898$, $R^2 = 0.50$, $P < 0.01$),按照拟合结果可知当磷肥使用量超过 95 kg P hm⁻²时,土壤速效磷含量并不会持续增加。

3.3 秸秆还田对粮食产量的贡献

1980—2014 年期间,由于高肥高水投入、频繁耕作以及高产品种的引入,作物产量迅速增加。通过对粮食产量的影响因子(包括年均温度、年均降雨量,以及秸秆还田量和氮肥施用量)与作物产量的单因素线性回归分析见图 4。其中,年均气温在这 30 年间有所增加,它和产量的关系用线性方程表示为 $y = 2.2873x - 16.002$ ($R^2 = 0.35$, $P < 0.01$),而降雨量和产量无显著相关($P = 0.117$)。20 世纪 80—90 年代氮肥施用量快速增加,

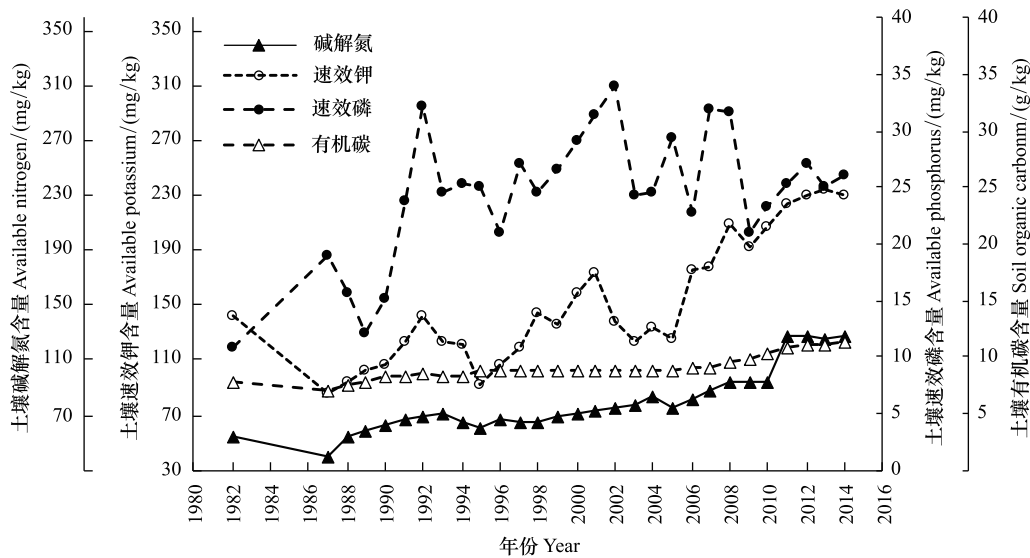


图 2 1982 到 2014 年桓台县土壤速效养分含量变化
Fig.2 Soil Available Nutrients in Huantai from 1982 to 2014

AvN:碱解氮 Available nitrogen;AvK:速效钾 Available potassium;AvP:速效磷 Available phosphorus;SOC:有机碳 Soil organic carbon

90 年代末逐渐减少,至 2011 年其用量约 500 kg N hm⁻²,其与粮食产量呈显著相关($P<0.01$)。此外,秸秆还田在 30 年集约化农业进程中的影响大大提高,它和产量用方程表示为 $y=3.8255\ln(x)+9.4722$ ($R^2=0.932$)。冬小麦和夏玉米产量与影响因素的偏相关分析(表 3)则表明,秸秆还田、化肥氮和钾与作物产量均呈显著相关,而产量与年均气温、降雨和化肥磷并没有体现出显著相关关系。

表 3 桓台县粮食产量与影响因子的偏相关分析
Table 3 Partial correlation analysis between grain yield and influencing factors in Huantai

控制变量 Control variables	偏相关系数 Partial correlation coefficient
氮肥施用量、温度 Fertilizer N applied, temperature	产量和秸秆还田量 0.724 ($P<0.001$, $df=26$)
秸秆还田量、温度 Straw incorporation, temperature	产量和氮肥施用量 0.368 ($P=0.054$, $df=26$)
秸秆还田量、氮肥施用量 Straw incorporation, fertilizer N applied	产量和温度 -0.010 ($P=0.960$, $df=26$)

3.4 秸秆还田对土壤有机碳含量的影响

从 1982 年到 2011 年,表层土壤(0—20 cm)有机碳含量从 7.8 g/kg 增至 11.3 g/kg,增加了 45%(图 2),土壤碳储量从 21.3 Mg C hm⁻²增加到 34.1 Mg C hm⁻²,增加速率达到了 399 kg C hm⁻² a⁻¹。县域尺度,SOC 储量(0—20 cm)从 534127 增加到了 853150 Mg(相当于 35446 Mg CO₂-eq a⁻¹)。从秸秆还田量和土壤有机碳含量的相关分析(图 5)可以看出,秸秆还田量和土壤中有机碳含量呈极显著相关关系,而从氮肥施用量和土壤有机碳含量的相关分析中(图 5),氮肥施用量对土壤有机碳含量影响较弱($R^2=0.18$, $P<0.05$),秸秆还田为主的外源有机碳输入比施用氮肥更能显著提高土壤有机碳含量。

3.5 秸秆还田对 N₂O、NH₃和氮淋溶的影响

在 2010—2014 年期间,年均施肥量所造成的 N₂O 累积排放量在县域尺度(25000 ha)为 28448 Mg CO₂-eq a⁻¹,相应的,土壤 SOC 固碳数量为 35446 Mg CO₂-eq a⁻¹,可以补偿由于化肥氮所造成的 N₂O 排放。在化肥的生产、运输和使用过程中所造成的温室气体排放被称为间接温室气体排放,在 2010—2014 年期间,由于秸秆

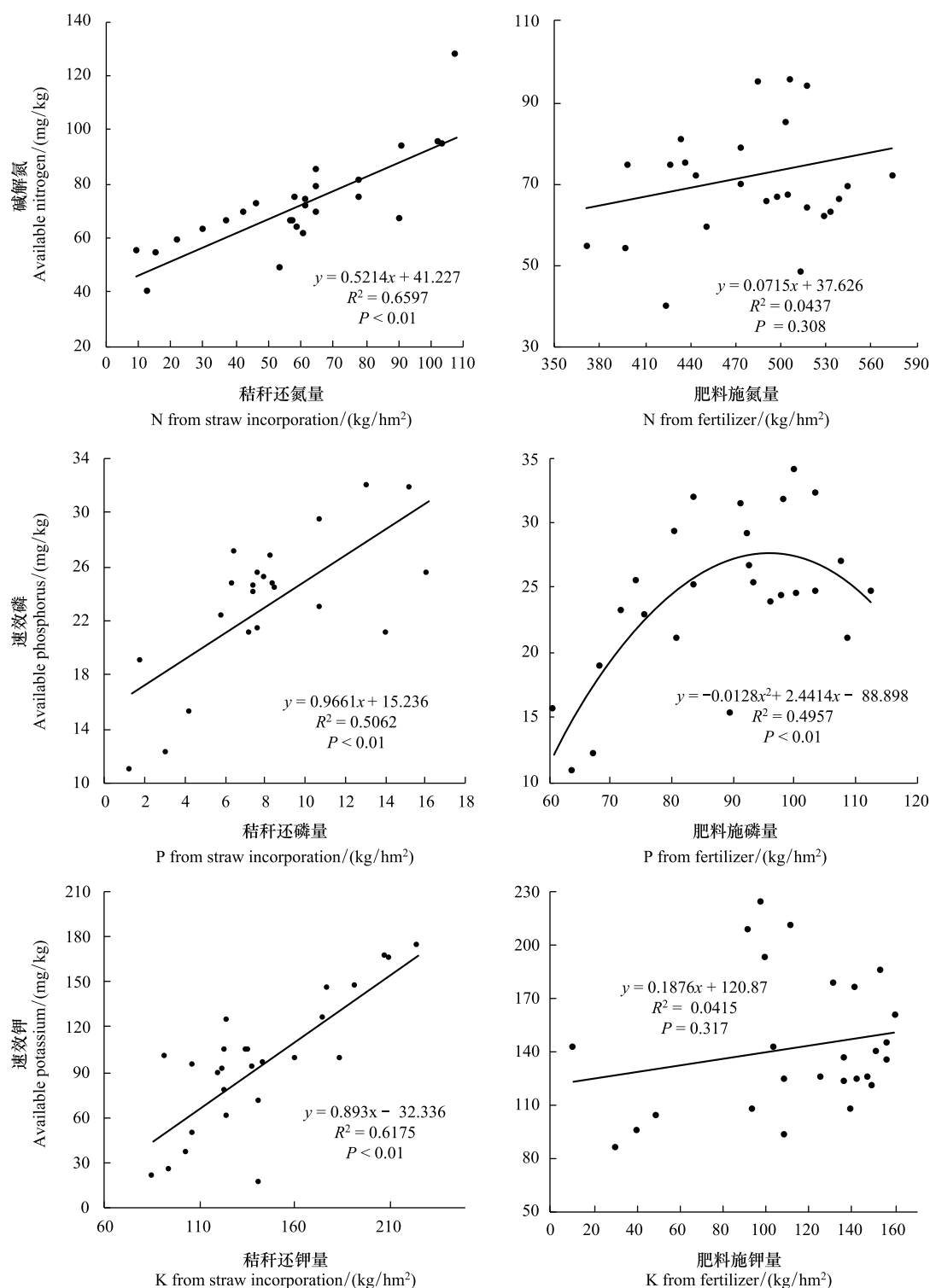


图3 秸秆还田以及施肥输入养分量和土壤速效养分含量的相关关系

Fig.3 Influence of straw incorporation and fertilization on soil available nutrients contents

还田会向土壤输入养分,折合后年均能分别减少化肥量为 2617 Mg N a^{-1} 、 $909 \text{ Mg P}_2\text{O}_5 \text{ a}^{-1}$ 和 $4830 \text{ Mg K}_2\text{O a}^{-1}$, 因此,折合为间接温室气体排放量后可知,秸秆还田在县域尺度能减少 $24528 \text{ Mg CO}_2\text{-eq a}^{-1}$ 的温室气体排放量。

2010—2014 年期间,全县范围内,作物秸秆还田能分别减少小麦季和玉米季的氨挥发量为 $85.6 \text{ Mg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和

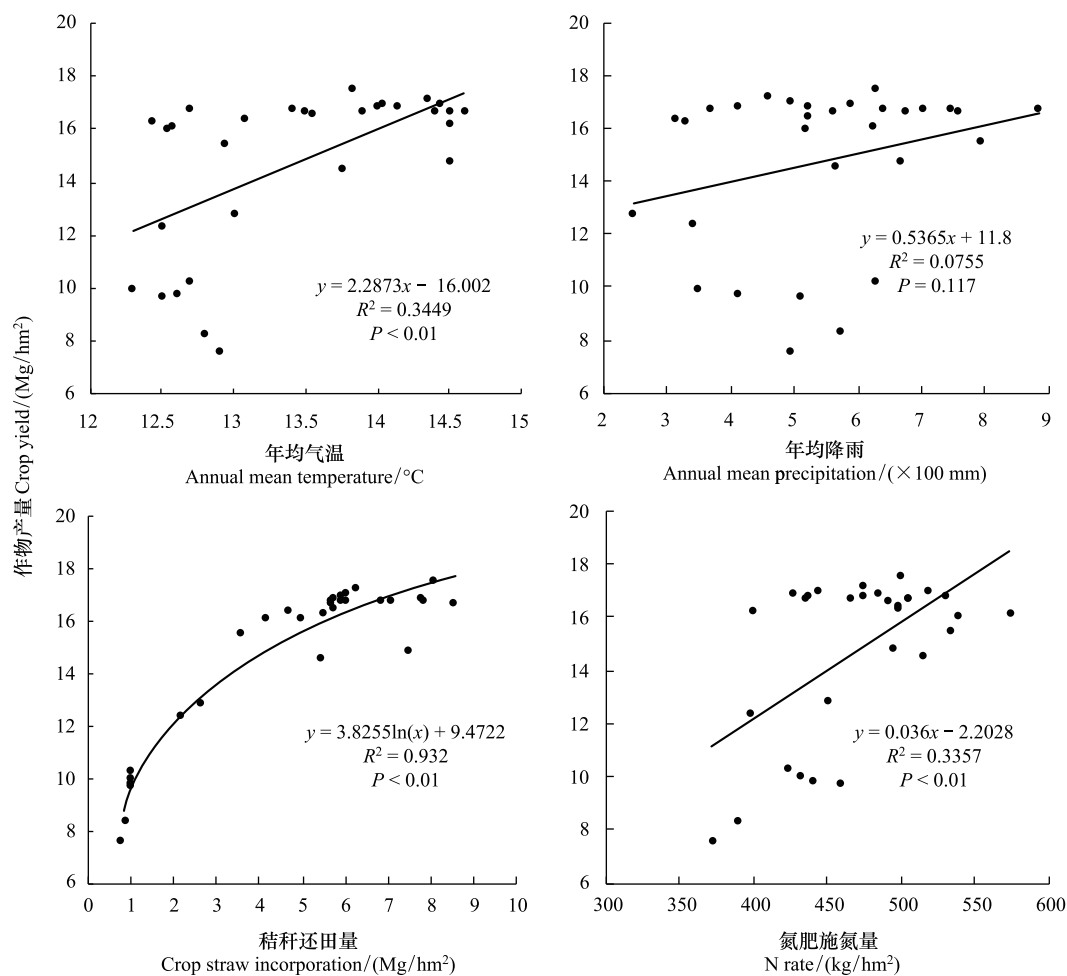


图4 粮食产量与自然因素、氮肥使用量及秸秆还田量的相关关系

Fig.4 Influence of environmental parameters, N rate and straw incorporation on crop yields

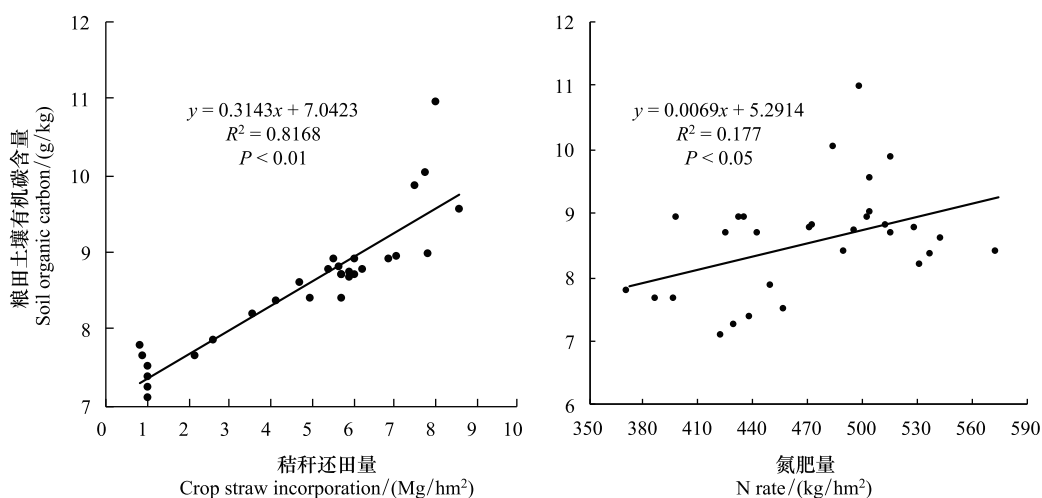


图5 桓台县秸秆还田以及施肥与土壤有机碳含量的相关关系

Fig.5 Influence of straw incorporation and fertilization on SOC content

70.8 Mg N hm⁻² a⁻¹, 并减少小麦季和玉米季的氮淋溶量分别为 109.6 Mg N hm⁻² a⁻¹ 和 177.8 Mg N hm⁻² a⁻¹。秸秆还田为主的外源有机质的输入对直接温室气体排放、氮素损失方面均能有重要意义。

4 讨论

4.1 秸秆还田对土壤养分和产量的影响

秸秆还田是农业生产中改善土壤肥力、提高土壤质量、保护生态环境的一种有效措施。作物秸秆还田能够为土壤返还作物生长所必需的氮、磷、钾和其他营养元素^[10], 显著提高土壤肥力, 改善作物生长所处的土壤环境^[4, 6, 23]。研究表明, 秸秆还田能显著提高小麦的产量, 且随秸秆还田量增加而增加^[24]。在桓台县, 在当地政府技术和经济政策的多重鼓励支持下, 冬小麦和夏玉米秸秆还田比例分别在 1998 年和 2008 年后达到了 >90% (表 1—2)。有研究表明秸秆短期还田对土壤养分含量并无显著影响^[25], 但在长期时间尺度水平上, 土壤养分 (尤其是 N、P、K、Ca、Mg 及其他微量元素) 却能维持较高含量^[26], 本研究中, 长期秸秆还田会增加土壤有机碳及速效养分的含量, 能产生巨大的经济效益和环境效益。

化肥磷的过量投入并没有增加土壤速效磷含量, 但长期秸秆还田配施氮肥为土壤补充氮素, 增加土壤碱解氮含量^[6], 因此土壤速效氮、磷、钾的增加, 主要是来自长期秸秆还田的贡献而不是化肥投入。秸秆粉碎还田后有利于有机质的矿化和分解并补偿作物对土壤养分的消耗量^[6, 27], 同时高 C/N 或 C/P 比有利于微生物的生长并促进养分的固定^[28]。秸秆等作物残体分解产生的有机质对磷素的吸收位具有掩蔽作用, 能提高磷的有效性, 长期秸秆还田会降低秸秆对磷素的吸附, 提高作物供给的有效磷^[28]。而从长远角度分析, 氮或磷的矿化是一个缓慢过程, 因此秸秆还田后在长期过程中并不会降低作物产量, 却能有效的补偿土壤养分库, 对农业生产中减氮和节约投入具有一定的贡献^[28]。劳秀荣等^[29]研究结果表明, 在相同施肥水平下, 土壤中速效钾含量与秸秆还田量呈正相关关系, 即使在不施钾肥的条件下, 秸秆还田也能补偿钾肥提供的速效钾, 并在一定程度上维持土壤钾素的平衡, 本研究获得了类似结果。此外, 长期秸秆还田能增加土壤持水量和通透性, 并改善土壤结构和质地, 这些方面也普遍认为是维持桓台地区作物高产的主要原因^[7-8]。赵红香等^[30]的结果进一步说明, 秸秆还田能提高玉米的千粒重和穗粒数, 并显著影响小麦的千粒重和有效穗数。

4.2 秸秆还田的土壤固碳效应

农田 SOC 水平受气候 (主要是温度和降水) 和农田管理措施, 包括作物秸秆还田、氮肥的使用、灌溉等的影响^[31]。中国作为粮食生产大国, 秸秆碳输入量大, 大约为 8 Mg C hm⁻² a⁻¹^[15], 约为美国的两倍 (4.2 Mg C hm⁻² a⁻¹)^[32], 而外源碳输入是增加 SOC 最有效的因素之一, Freibauer 等^[33]的研究结果表明秸秆碳输入能显著增加土壤有机碳含量, 同时, 秸秆还田配施化肥更有助于土壤有机质的增加^[5], 因此, 秸秆还田不仅有利于降低环境污染风险, 还有利于农业废弃物资源的循环利用。桓台地区, 在 1982—2014 年期间, 0—20 cm 土层 SOC 储量增加速率达 399 kg C hm⁻² a⁻¹, 主要是由于小麦和秸秆还田后带入了高量的有机碳, 该结果已经显著高于诸多其他学者的研究结果^[32], 而 Smith 等^[34]称秸秆还田条件下可达到最高的固碳率 (0.7 Mg C hm⁻² a⁻¹), 而只施氮肥的处理固碳率仅 0.2 Mg C hm⁻² a⁻¹。需要指出的是, 桓台县当前有机碳含量水平仍然远低于发达国家水平 (美国、欧盟等为 25 g/kg)^[35], 因此, 桓台地区农田土壤还具有较大的固碳潜力。

4.3 秸秆还田的生态效应

大量作物秸秆直接进行焚烧处理, 不仅会造成秸秆中 N、P、K 等养分的损失^[10]和氮素淋溶^[9], 还能严重影响空气质量^[9]。由于秸秆量大以及科学技术条件的限制, 华北地区在 80 年代每到 10 月或者 6 月都会出现严重的空气污染等质量问题, 最根本的原因就是冬小麦和夏玉米收获后所产生的大量秸秆被直接焚烧导致^[14]。秸秆还田措施也存在诸多负面影响, 有研究发现, 秸秆大量还田短期内会降低土壤氧气浓度, 促进土壤反硝化过程的发生, 增加 N₂O 排放量^[13], 同时还能增加土壤微生物在秸秆降解过程中对土壤养分的消耗, 增加了作物与微生物的养分利用竞争, 不利于作物的生长^[36], 同时还能增加杂草生长, 降低出苗率^[12], 以及氮素淋溶风险^[13]。

在 20 世纪 90 年代,桓台地区农业种植过程中杂草生长和播种出苗率低是限制高产的重要原因。进入 21 世纪后,机械化程度提高和技术水平优化,逐渐解决了杂草和出苗率低等问题。在桓台县,秸秆还田后有有机氮会被固定在土壤碳库中,一定程度上能缓解硝化和反硝化过程的发生,秸秆还田会增加土壤异养微生物对土壤氧气的消耗,并形成了土壤厌氧环境,从而有利于硝化细菌反硝化过程和反硝化过程的发生,总体上秸秆还田和氮肥耦合,降低了相同水平氮肥使用造成的 N_2O 排放^[37]。秸秆长期还田会增加土壤有机质含量,而土壤有机质的分解过程中会产生大量有机酸,降低土壤 pH 并提高土壤的吸附能力,从而降低 NH_4^+ 离子的活性并抑制氨挥发^[38]。Ambus 和 Jensen^[39]发现秸秆还田后能给土壤微生物提供充足的碳、氮源,促进土壤微生物活性并将土壤无机氮固定并转化为有机氮。氮淋溶作为华北地区氮素损失的主要途径之一^[40],通过合理的农田措施降低氮素淋溶对降低农业投入成本和环境污染风险,提高氮素利用效率起着重要的作用,秸秆还田会增加土壤持水能力,并降低土壤中无机氮以及水分的垂直迁移,从而降低氮素向深层土壤的累积^[41]。

除了直接还田,作物秸秆还可以用来生产生物炭、发展生物质能、生产食用菌、堆肥以及替代动物饲料。我们利用 DNDC 模型验证表明,与秸秆直接还田相比,转化成有机肥后进行还田,对于农田土壤有机质的提升效果更好(增加量可达 2.1%—6.0%)^[42],因此,堆肥以及有机肥可以在今后当地作物秸秆管理中进行尝试和推广。

5 结论

在过去三十多年间的集约化农业进程中,桓台县秸秆还田显著提高了土壤速效养分含量和土壤有机碳含量,增加土壤固碳水平,缓解和补偿土壤中 N、P、K 等养分的消耗,稳步提高作物产量,其中土壤碱解氮、速效磷和速效钾在 1982 年至 2014 年间分别增加了 134%、139% 和 62%,表层土壤有机碳含量增加了 45%。长期秸秆还田能完全补偿由施用化肥所造成的直接温室气体排放量,同时秸秆还田带入的 N、P、K 还可以减少 20%—24% 的间接温室气体排放、 NH_3 挥发和氮素淋溶。因此,在桓台集约化农业生产区,秸秆还田已经作为农业生产中固碳减排、提高土壤养分的重要农田措施之一,对实现未来农业可持续发展起着重要作用,建议未来对秸秆进行堆肥或作为畜牧饲料替代等措施进行进一步研究,从而更好实现经济和环境效应。

参考文献 (References):

- [1] Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. The assessment and utilization of straw resources in China. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(12): 1807-1815.
- [2] 赵秀玲,任永祥,赵鑫,濮超,张向前,张海林. 华北平原秸秆还田生态效应研究进展. *作物杂志*, 2017, (1): 1-7.
- [3] Lu F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(8): 1545-1568.
- [4] Lehtinen T, Schlatter N, Baumgarten A, Bechini L, Krüger J, Grignani C, Zavattaro L, Costamagna C, Spiegel H. Effect of crop residue incorporation on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in European agricultural soils. *Soil Use and Management*, 2014, 30(4): 524-538.
- [5] 王爱玲,高旺盛,洪春梅. 华北灌溉区秸秆焚烧与直接还田生态效应研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 142-144.
- [6] 陈尚洪,朱钟麟,刘定辉,舒丽,王昌全. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 806-809.
- [7] 余坤,冯浩,王增丽,丁奠元. 氮化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 165-173.
- [8] 王珍,冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 75-80.
- [9] Hooker M L, Herron G M, Penas P. Effects of residue burning, removal, and incorporation on irrigated cereal crop yields and soil chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(1): 122-126.
- [10] Singh M, Sharma S N. Effect of wheat residue management practices and nitrogen rates on productivity and nutrient uptake of rice (*Oryza sativa*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system. *Indian Journal of Agricultural Science*, 2000, 70(12): 835-839.
- [11] Xia L L, Wang S W, Yan X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 118-127.
- [12] Turley D B, Phillips M C, Johnson P, Jones A E, Chambers B J. Long-term straw management effects on yields of sequential wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in clay and silty clay loam soils in England. *Soil and Tillage Research*, 2003, 71(1): 59-69.
- [13] 王德建,常志州,王灿,张刚,张斯梅. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控. *中国生态农业学报*, 2015, 23(9): 1073-1082.
- [14] Han D R, Wiesmeier M, Conant R T, Kühnel A, Sun Z G, Kögel-Knabner I, Hou R X, Cong P F, Liang R B, Ouyang Z. Large soil organic

- carbon increase due to improved agronomic management in the North China Plain from 1980s to 2010s. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 987-1000.
- [15] Liao Y, Wu W L, Meng F Q, Smith P, Lal R. Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in northern China. *Biogeosciences*, 2015, 12(5): 1403-1413.
- [16] Smith P, Martino D, Cai Z C, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G X, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [17] 淄博市统计局. 2017 淄博统计年鉴. (2017-02-22) [2020-02-28]. <http://tj.zibo.gov.cn/attach/0/201803121123.pdf>.
- [18] 中国土壤数据库. 全国第二次土壤普查农田肥力数据库. [2020-02-28]. <http://vdb3.soil.csdb.cn/extend/jsp/introduction>.
- [19] Zhang X, Bol R, Rahn C, Xiao G M, Meng F Q, Wu W L. Agricultural sustainable intensification improved nitrogen use efficiency and maintained high crop yield during 1980-2014 in northern China. *Science of the Total Environment*, 2017, 596-597: 61-68.
- [20] Yan G X, Zheng X H, Cui F, Yao Z S, Zhou Z X, Deng J, Xu Y. Two-year simultaneous records of N_2O and NO fluxes from a farmed cropland in the northern China plain with a reduced nitrogen addition rate by one-third. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 178: 39-50.
- [21] Cui Z L, Wang G L, Yue S C, Wu L, Zhang W F, Zhang F S, Chen X P. Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(10): 5780-5787.
- [22] IPCC. Climate change 2014: synthesis report//Pachauri R K, Meyer L A, eds. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014: 151.
- [23] Raffa D W, Bogdansk A, Titttonell P. How does crop residue removal affect soil organic carbon and yield? A hierarchical analysis of management and environmental factors. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 81: 345-355.
- [24] 武际, 郭熙盛, 张祥明, 王允青, 许征宇, 鲁剑巍. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 87-93.
- [25] Engström L, Lindén B. Temporal course of net N mineralization and immobilization in topsoil following incorporation of crop residues of winter oilseed rape, peas and oats in a northern climate. *Soil Use and Management*, 2012, 28(4): 436-447.
- [26] Davari M R, Sharma S N, Mirzakhani M. Effect of cropping systems and crop residue incorporation on production and properties of soil in an organic agroecosystem. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2012, 28(3): 206-222.
- [27] Chaves B, De Neve S, Del Carmen Lillo Cabrera M, Boeckx P, Van Cleemput O, Hofman G. The effect of mixing organic biological waste materials and high-N crop residues on the short-time N_2O emission from horticultural soil in model experiments. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(6): 411-418.
- [28] Varinderpal-Singh, Dhillon N S, Brar B S. Effect of incorporation of crop residues and organic manures on adsorption/desorption and bio-availability of phosphate. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 76(1): 95-108.
- [29] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 郝艳如, 张昌爱. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. *土壤学报*, 2003, 40(4): 618-623.
- [30] 赵红香, 迟淑筠, 宁堂原, 田慎重, 王丙文, 李增嘉. 科学耕作与留茬改良小麦-玉米两熟农田土壤物理性状及增产效果. *农业工程学报*, 2013, 29(9): 113-122.
- [31] Ladha J K, Reddy C K, Padre A T, Van Kessel C. Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(6): 1756-1766.
- [32] Johnson J M F, Allmaras R R, Reicosky D C. Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizodeposits using the national grain-yield database. *Agronomy Journal*, 2006, 98(3): 622-636.
- [33] Freibauer A, Rounsevell M D A, Smith P, Verhagen J. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 2004, 122(1): 1-23.
- [34] Smith P, Davies C A, Ogle S, Zanchi G, Bellarby J, Bird N, Boddey R M, McNamara N P, Powlson D, Cowie A, Van Noordwijk M, Davis S C, Richter D D B, Kryzanowski L, Van Wijk M T, Stuart J, Kirton A, Eggar D, Newton - Cross G, Adhya T K, Braimoh A K. Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: current capability and future vision. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2089-2101.
- [35] Ludwig B, Geisseler D, Michel K, Joergensen R G, Schulz E, Merbach I, Raupp J, Rauber R, Hu K, Niu L, Liu X. Effects of fertilization and soil management on crop yields and carbon stabilization in soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 361-372.
- [36] Gilmour J T. Estimating yield and yield response using computer simulation of plant available nitrogen from soil organic matter and manure. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 328-330.
- [37] Tan Y C, Wu D, Bol R, Wu W L, Meng F Q. Conservation farming practices in winter wheat-summer maize cropping reduce GHG emissions and maintain high yields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 272: 266-275.
- [38] Bolan N S, Hedley M J, White R E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. *Plant and Soil*, 1991, 134(1): 53-63.
- [39] Ambus P, Jensen E S. Crop residue management strategies to reduce N-losses—interaction with crop N supply. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7/8): 981-996.
- [40] 徐鹏, 后希康, 周丰, 营娜, 赵广超. 华北平原农田硝态氮淋溶率和淋溶负荷估计. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 3173-3180.
- [41] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 林文, 梁婷. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响. *土壤学报*, 2013, 50(3): 564-573.
- [42] Liao Y, Wu W L, Meng F Q, Li H. Impact of agricultural intensification on soil organic carbon: A study using DNDC in Huantai County, Shandong Province, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(6): 1364-1375.