植物营养与肥料学报 2008,14(6):1186-1192
Plant Nutrition and Fertilizer Science

# 风化煤复合包裹控释肥对小麦生长发育及土壤酶活性的影响

党建友[1],王秀斌[2],裴雪霞[1,2],杨 峰[1],程麦凤[1],王姣爱[1],张定一[1*]
(1 山西省农科院小麦研究所,山西临汾 041000;2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

**摘要**:通过田间试验,研究了风化煤复合包裹控释肥对小麦产量、叶片净光合速率(Pn)、植株干重及养分和土壤速效养分及酶活性的影响。结果表明,施用控释肥的小麦产量均较不施肥(CK)和氮磷钾配施(NPK)的升高,结构改善。与 NPK 相比成穗数降低,千粒重和穗粒数提高;等养分量控释肥增产 6.69%~16.92%。控释肥使冬小麦中后期叶片 Pn、植株干重、全 N 和全 K 含量提高;等养分量控释肥较 NPK 处理子粒蛋白质含量提高。与 NPK 处理相比,控释肥处理土壤速效养分在冬小麦生长发育前期低、中后期高,同时提高了土壤酶活性,有利于小麦养分吸收与运转,使得肥料利用率提高。供试控释肥中以水玻璃控释材料包裹的控释肥(WCRF)效果最好,明显激活了土壤酶活性,使土壤养分供应充足,小麦生长发育后期叶片 Pn、干重及养分含量及子粒产量最高。

**关键词**:风化煤复合包裹控释肥;冬小麦;生长发育;土壤酶活性
**中国分类号**:S145.5;S512.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2008)06-1186-07

# Effect of weathered coal-based coated fertilizer on winter wheat growth and soil enzyme activity

DANG Jian-you[1], WANG Xiu-bin[2], PEI Xue-xia[1,2], YANG Feng[1], CHENG Mai-feng[1], WANG Jiao-ai[1], ZHANG Ding-yi[1*]
(*1 Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen, Shanxi 041000, China;*
*2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China*)

**Abstract**: Controlled-release fertilizer (CRF) has emerged as a potential approach to solving the problems associated with the application of conventional fertilizers. It can improve fertilizer use efficiency, reduce application times and environment pollution. Three controlled-release fertilizers coated with three controlled-release materials, modified starch, resin and water glass, combined with weathered coal were called as MCRF, RCRF, and WCRF, respectively. The treatments were, no fertilizer (CK), NPK fertilizers (NPK), $MCRF_1$, $RCRF_1$, $WCRF_1$ (which used equivalent NPK rate to NPK treatment), $MCRF_2$, $RCRF_2$, $WCRF_2$ (which used 80% NPK rate to NPK treatment). Effects of weathered coal-based coated fertilizer on wheat yield, leaf net photosynthesis (Pn), plant dry weight, plant nutrient content, soil available nutrients and soil enzyme activity were studied. Results showed that, CRF application improved yield components, and so yield was increased compared with CK and NPK treatments. Compared with NPK treatment, CRF decreased spike numbers per hectare, but increased 1000-kernel weight and grains per spike. Yield of CRF1 (included $MCRF_1$, $RCRF_1$, $WCRF_1$) were increased 6.69%-16.92% over NPK treatment. CRF increased leaf Pn in middle and later stage of wheat, plant dry weight and nutrient contents, and increased grain protein content over NPK treatment. WCRF increased soil enzymes activity, soil nutrient contents, leaf Pn in middle and late growth stage, plant dry weight, plant nutrient contents, and wheat yield. Its nutrient release was more synchronized with nutrient need than other treatments.

**收稿日期**:2007-11-16　　**接受日期**:2008-03-06
**基金项目**:山西省科技攻关项目(2006031044-01);现代农业(小麦)产业技术体系(MATS)专项资助。
**作者简介**:党建友(1972—),男,山西芮城人,助理研究员,主要从事新型肥料研制及小麦栽培。Email:dangjyou8605@sina.com
* **通讯作者** Tel:0357-2882206, zdyi888@163.com

**Key words**：weathered coal-based coated fertilizer；winter wheat；growth；soil enzyme activity

控释肥能提高肥料利用率，减少肥料使用次数，降低环境污染，应用前景良好[1-3]。各国已实现工业化生产的缓/控释肥主要有脲甲醛、草酰胺、硫包衣尿素及聚合物薄膜肥料[4]。控释材料是控释肥生产的重要基础，高效低成本控释材料是研制的关键[5]。近年来，我国在控释材料研究取得了一些成果，如沸石、膨润土、木质素、改性矿物和天然多糖等作为控释材料获得了成功[1,5]。风化煤富含活性物质腐殖酸，而腐殖酸具有多种活性基团（羧基、酚羟基、醇羟基、甲氧基等），赋予腐殖酸多种功能，如酸性、亲水性、阳离子交换性、络合能力及较高的吸附能力。同时，腐殖酸是有机质重要组成部分，对促进作物营养代谢，增强作物抗逆性能，改善土壤理化性状等都有良好作用[6-8]，其开发利用前景十分广阔。山西省风化煤资源丰富，价格低廉。因此，以风化煤和其他聚合材料为控释材料研制了复合包裹型控释肥，并研究其对冬小麦生长发育的影响，为风化煤复合包裹控释材料应用提供科学依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　供试材料

供试肥料为 3 种自制风化煤复合包裹型控释肥料。控释肥由核心肥料、风化煤包裹层和致密包裹层组成。核心肥料为尿素、磷酸一铵和氯化钾制成 $N-P_2O_5-K_2O$ 为 22-8-11 的复合肥，约占总重 75%，然后包裹 20% 的风化煤，最后包裹 5% 不同控释材料，形成致密包裹层（包裹层总厚度约为 0.2 mm）。外层控释材料分别为改性淀粉、聚乙烯树脂和水玻璃。转盘造粒工艺制成 $N-P_2O_5-K_2O$ 为 16-6-8 的控释肥，经筛分后，以直径为 3.0～4.0 mm 供试颗粒。3 种控释肥分别用 MCRF、RCRF 和 WCRF 表示。供试肥料为：尿素（N 46%）、磷酸一铵（N 11%，$P_2O_5$ 44%）、普钙（$P_2O_5$ 17%）、氯化钾（$K_2O$ 60%）；小麦品种为临优 2069。

### 1.2　试验设计

田间试验于 2006 年在山西省农科院小麦研究所试验田进行。试验地为石灰性褐土，质地中壤，0—25 cm 耕层土壤有机质为 14.52 g/kg，全 N 1.18 g/kg、碱解 N 84.62 mg/kg，速效 P 8.57 mg/kg，速效 K 101.35 mg/kg，pH 7.9。

试验设：CK 不施肥对照；NPK 氮磷钾配施，施肥量为 N 225 kg/km$^2$，$P_2O_5$ 120 kg/km$^2$，$K_2O$ 150 kg/km$^2$；$MCRF_1$、$RCRF_1$ 和 $WCRF_1$，施用量所含 N、P、K 养分量与 NPK 处理相等（即等养分量处理）；$MCRF_2$、$RCRF_2$ 和 $WCRF_2$，施用量所含 N、P、K 养分量为 NPK 处理的 80%（80% 养分量处理），控释肥处理中 P、K 养分不足部分由普钙和氯化钾补足。共 8 个处理，重复 4 次，随机区组排列，小区面积为 4.0 m × 5.0 m。

NPK 处理磷、钾肥全部基施，氮肥 60% 基施，40% 于返青期追施，控释肥全部基施。10 月 2 日播种，6 月 10 日收获。基本苗为每公顷 225.0 × $10^4$ 株。其他管理措施同大田。

### 1.3　测定项目与方法

收获前，每小区选 2 个有代表性的 1 m$^2$ 样方调查成穗数，另取 10 株进行室内考种，调查穗粒数等。晾干后数 500 粒称重，换算成千粒重，重复 2 次（重复间相差 ≤ 0.5 g）。

从返青期开始，选取朝向长势基本一致的叶片测定净光合速率，直到蜡熟期结束。于上午 9：00—11：00 用英国 Lci 光合测定仪测定净光合速率（$P_n$）。测定时光强为（1500 ± 50）μmol/（m$^2$·s），温度为（30 ± 1）℃，$CO_2$ 浓度为（380 ± 10）μmol/mol 空气，共测 6 次。

分别于越冬前、返青期、拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期每小区取冬小麦 10 株，迅速带回室内清洗干净，在 100℃ 左右杀青 30 min 后，70℃ 烘至恒重，称重，然后粉碎测定植株氮钾含量；取 0—25 cm 土壤样品风干后测定土壤中速效养分和土壤酶活性。

植株全氮用半微量凯氏定氮法，土壤碱解 N 用碱解扩散法，土壤速效磷用钼锑抗比色法，植株全钾和土壤速效钾用火焰光度计法测定[9]。土壤脲酶活性用苯酚-次氯酸钠比色法测定，以 $NH_3$-N mg/（g·d）表示；蔗糖酶用 3，5-二硝基水杨酸比色法测定，以葡萄糖 mg/（g·d）表示；磷酸酶活性用苯磷酸二钾法测定，以酚 mg/（g·d）表示；过氧化氢酶活性用高锰酸钾活性测定，以 $KMnO_4$ mL/（g·d）表示[10]。

## 2　结果与分析

### 2.1　控释肥对冬小麦产量结构、子粒产量及蛋白质含量的影响

表 1 看出，与 CK 和 NPK 处理比较，控释肥处理能使小麦千粒重和穗粒数提高，差异达显著或极显著水平。其中以 $WCRF_1$ 提高最多，千粒重分别提高

6.25%和8.80%；穗粒数提高1.25%和1.10%。成穗数控释肥处理较CK增加了$53.14\times10^4$～$91.04\times10^4$穗/$hm^2$，差异达极显著水平；但较NPK处理减少$6.89\times10^4$～$44.81\times10^4$穗/$hm^2$。小麦产量分别增产14.95%～32.63%和1.33%～16.92%。其中，以$WCRF_1$增产效果最好，与其他处理间差异达极显著水平。施肥使子粒蛋白质含量提高，等养分量控释肥处理子粒蛋白质含量较NPK处理提高，差异达显著或极显著水平，80%养分量控释肥处理与NPK处理相近。控释肥虽使成穗数小幅减少，但冬小麦千粒重、穗粒数、子粒蛋白质含量和产量提高。

表1 冬小麦产量结构、子粒产量和蛋白质含量

Table 1 Yield, its components and protein content of winter wheat

| 处理 Treatments | 千粒重(g) 1000-kernel wt. | 穗粒数(No.) Grain per spike | 成穗数($\times10^4$/$hm^2$) Spike numbers | 子粒产量(kg/$hm^2$) Grain yield | 子粒蛋白质(%) Grain protein |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 35.36±1.63 cdBC | 40.27±0.76 eC | 403.22±5.10 dF | 4637.22±32.33 gG | 13.45±0.21 dD |
| NPK | 34.53±0.82 dC | 40.80±0.50 deDC | 501.22±2.03 aA | 5260.34±53.33 fF | 14.15±0.26 cBC |
| $MCRF_1$ | 36.51±0.74 abcAB | 44.60±1.84 abA | 490.48±16.93 aABC | 5612.37±29.36 cC | 14.27±0.17 bBC |
| $RCRF_1$ | 36.61±0.34 abAB | 44.75±1.67 abA | 486.55±0.30 bB | 5992.08±27.69 bB | 14.31±0.09 bB |
| $WCRF_1$ | 37.57±0.88 aA | 45.30±0.22 aA | 494.24±5.71 aAB | 6150.46±61.48 aA | 14.54±0.24 aA |
| $MCRF_2$ | 35.60±1.47 bcBC | 42.21±0.84 cdBC | 469.06±12.54 bD | 5330.50±38.05 eE | 14.11±0.23 cC |
| $RCRF_2$ | 35.45±1.92 bcBC | 43.95±0.82 abAB | 456.41±13.70 cD | 5400.29±107.63 eDE | 14.14±0.13 cBC |
| $WCRF_2$ | 35.96±0.57 bcBC | 43.37±1.44 bcAB | 475.45±4.03 bCD | 5501.34±57.53 dCD | 14.20±0.11 bcBC |

注(Note)：同列数据后不同大小写字母分别表示差异达0.01和0.05显著水平，下同 Values followed by different capital and small letters are significant at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same below.

## 2.2 控释肥对冬小麦叶片净光合速率(Pn)的影响

施肥使叶片净光合速率(Pn)提高，且与CK差异达极显著水平。返青期、拔节期和孕穗期以NPK叶片Pn最高；返青期除$MCRF_1$和$RCRF_1$外，NPK与其他处理间差异达显著或极显著水平；拔节期和孕穗期各处理间差异较小。随着生育期推移，控释肥处理叶片Pn下降相对缓慢，抽穗期等养分量控释肥处理叶片Pn高于NPK处理；灌浆期和蜡熟期控释肥处理均高于NPK处理，以$WCRF_1$处理最高，到蜡熟期其叶片Pn仍达7.10 μmol/($m^2$·s)，与其他处理间差异达极显著。冬小麦生长发育后期叶片保持较高的Pn，有利于干物质积累提高粒重增产(表2)。

表2 不同施肥处理冬小麦叶片净光合速率(Pn)的变化[μmol/($m^2$·s)]

Table 2 Leaf net photosynthesis (Pn) of winter wheat under different fertilizers treatments

| 处理 Treatments | 返青期 Regreening stage | 拔节期 Jointing stage | 孕穗期 Booting stage | 抽穗期 Heading stage | 灌浆期 Filling stage | 蜡熟期 Dough stage |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 15.41±0.15 dC | 18.39±3.13 cB | 21.03±1.48 f D | 17.10±1.22 dD | 17.13±0.73 cC | 1.02±0.20 dD |
| NPK | 18.99±1.16 aA | 22.05±1.11 aA | 25.90±1.25 aA | 19.22±0.85 bBC | 18.15±1.04 bB | 1.78±0.14 cC |
| $MCRF_1$ | 18.34±0.88 abAB | 21.93±0.67 aA | 23.95±1.90 bcdAB | 19.47±0.78 bABC | 19.56±1.15 aA | 2.88±0.95 cC |
| $RCRF_1$ | 18.00±0.32 abcAB | 21.16±1.23 abA | 24.56±1.28 abAB | 19.78±0.81 bAB | 19.79±1.57 aA | 4.63±0.68 bB |
| $WCRF_1$ | 17.19±1.26 bcABC | 20.58±1.92 abA | 24.44±1.01 abcAB | 21.20±0.70 aA | 19.90±2.035 aA | 7.10±1.06 aA |
| $MCRF_2$ | 17.74±0.46 abcAB | 20.06±1.33 abA | 22.16±1.46 deB | 17.80±0.99 cC | 18.64±1.72 bB | 2.29±0.25 cC |
| $RCRF_2$ | 16.89±1.13 cBC | 19.92±1.50 abA | 23.44±1.02 bcdeAB | 18.73±1.09 bcBC | 18.84±1.27 bAB | 2.35±0.62 cC |
| $WCRF_2$ | 16.70±0.49 cdBC | 19.27±1.48 abA | 22.70±1.22 cdeB | 19.11±1.02 bcBC | 19.63±0.93 aA | 4.53±1.50 bB |

## 2.3 控释肥对冬小麦各生育期植株干重的影响

表3表明，施肥使植株干重提高，与CK差异均达极显著水平。越冬前、返青期和拔节期以NPK处理干重最高，但越冬前、返青期差异未达显著水平，拔节期差异显著。孕穗期到成熟期控释肥处理植株干重逐渐快速提高，NPK处理提高相对较慢，干重较低。控释肥中以WCRF效果较好，说明控释肥对冬小麦中后期干物质积累有促进作用。

表 3　控释肥对不同生育时期冬小麦单株干重影响(g/plant)

Table 3　Effect of CRF on dry weight per plant at different growth stages of winter wheat

| 处理 Treatments | 越冬前 Pre-winter | 返青期 Regreening stage | 拔节期 Jointing stage | 孕穗期 Booting stage | 抽穗期 Heading stage | 灌浆期 Filling stage | 成熟期 Mature stage |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 0.67 ± 0.05 cB | 0.94 ± 0.14 cB | 1.34 ± 0.05 dC | 1.71 ± 0.11 dD | 2.06 ± 0.10 cC | 2.68 ± 0.09 cC | 3.59 ± 0.10 cC |
| NPK | 0.94 ± 0.15 aA | 1.25 ± 0.17 aA | 1.96 ± 0.02 aA | 2.25 ± 0.27 abAB | 2.58 ± 0.17 bB | 3.23 ± 0.02 bB | 3.68 ± 0.14 bAB |
| $MCRF_1$ | 0.89 ± 0.06 abA | 1.23 ± 0.14 aAB | 1.78 ± 0.05 bAB | 2.26 ± 0.21 abAB | 2.71 ± 0.05 abBA | 3.29 ± 0.16 bB | 3.91 ± 0.26 bAB |
| $RCRF_1$ | 0.87 ± 0.07 abA | 1.19 ± 0.19 aAB | 1.76 ± 0.14 bAB | 2.35 ± 0.11 aA | 2.78 ± 0.04 aA | 3.46 ± 0.02 bAB | 4.05 ± 0.15 aA |
| $WCRF_1$ | 0.85 ± 0.11 abA | 1.11 ± 0.11 abAB | 1.69 ± 0.11 bAB | 2.34 ± 0.12 aA | 2.86 ± 0.14 aA | 3.61 ± 0.08 aA | 4.18 ± 0.05 aA |
| $MCRF_2$ | 0.80 ± 0.10 bAB | 1.10 ± 0.21 abAB | 1.55 ± 0.14 cBC | 2.01 ± 0.15 bcBC | 2.59 ± 0.07 bB | 3.26 ± 0.08 bB | 3.80 ± 0.13 bB |
| $RCRF_2$ | 0.78 ± 0.08 bcAB | 1.06 ± 0.19 abAB | 1.52 ± 0.17 cdBC | 2.18 ± 0.23 bBC | 2.62 ± 0.03 bBA | 3.27 ± 0.07 bB | 3.80 ± 0.15 bB |
| $WCRF_2$ | 0.78 ± 0.07 bcAB | 1.02 ± 0.14 bAB | 1.43 ± 0.00 cdC | 2.07 ± 0.16 bcBC | 2.68 ± 0.15 abBA | 3.31 ± 0.12 bB | 3.89 ± 0.05 bAB |

## 2.4　控释肥对冬小麦各生育期植株全 N 和全 K 含量的影响

施肥使各生育期植株全 N 含量明显提高(图 1A)。越冬期到拔节期以 NPK 处理植株全 N 含量高于控释肥，但与等养分量控释肥差异较小；孕穗期后 NPK 处理全 N 含量下降较快，植株全 N 含量低于等养分量控释肥处理；抽穗以后植株全 N 含量以 $WCFR_1$ 最高。越冬前和返青期以 NPK 处理植株全 K 含量最高，控释肥相对较低；返青期后，控释肥处理植株全 K 含量提高相对较快，到拔节期植株全 K 含量高于 NPK 处理(图 1B)。抽穗期后，以 $WCFR_1$ 植株全钾含量最高，但与其他控释肥间差异较小。

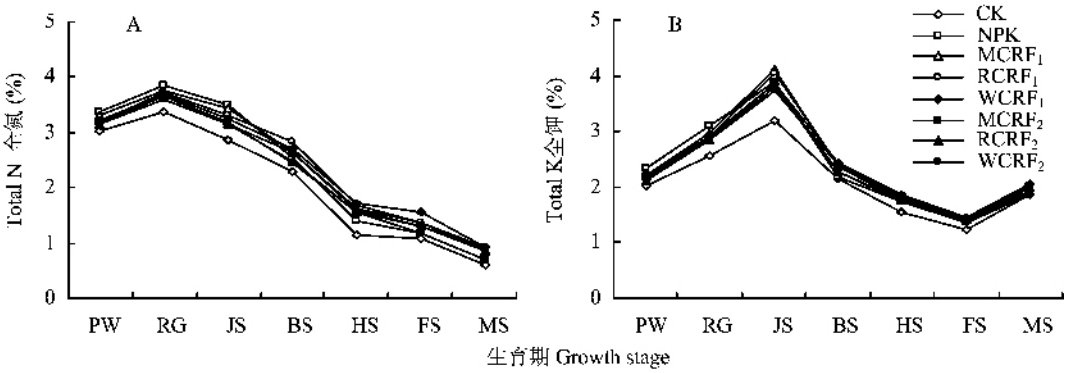


图 1　控释肥对冬小麦各生育期植株全 N 和全 K 影响

Fig.1　Effect of CRF on plant total N and K content at different growth stages of winter wheat

[注(Note)：PT—冬前 Pre winter；RG—返青期 Regreening stage；JS—拔节期 Jointing stage；BS—孕穗期 Booting stage；HS—抽穗期 Heading stage，FS—灌浆期 Filling stage；MS—成熟期 Mature stage．下同 The same below]

## 2.5　控释肥对氮、钾利用效率的影响

控释肥明显提高了氮、钾肥的利用率(表 4)，等养分量控释肥处理，氮钾肥利用率为 30.84%～42.98% 和 40.81%～55.39%，较 NPK 处理提高 11.89%～24.03% 和 11.28%～25.86%；80% 养分量控释肥利用率为 23.79%～35.44% 和 35.01%～42.39%，较 NPK 处理提高 4.83%～16.48% 和 4.95%～12.86%。控释肥中以 WCRF 效果最好，氮钾肥利用率最高。

## 2.6　控释肥对土壤中速效养分含量的影响

越冬前到拔节期土壤中碱解 N 均以 NPK 处理最高，较等养分量控释肥处理提高 6.66～22.21 mg/kg；从孕穗期开始 NPK 处理土壤碱解 N 含量快速下降，低于等养分量控释肥处理(图 2A)。越冬前到拔节期土壤速效 P 均以 NPK 处理最高，控释肥处理相对较低；随着生育期推移，NPK 处理土壤速效 P 持续快速下降，直至收获期，而控释肥处理土壤中速效 P 含量先提高，然后缓慢降低(图 2B)。

图 2C 看出，CK 和 NPK 处理土壤速效 K 含量从越冬前到灌浆期持续降低，成熟期才有所提高；控释肥处理土壤速效 K 含量先逐渐升高，返青期达最高，然后降低，至收获时有所回升。控释肥中以

WCRF 效果较好。施用控释肥,冬小麦生育前期土壤速效养分含量相对较低,而中后期土壤中保持较高的速效养分水平,保证了冬小麦高产对养分的需求。另外,收获期控释肥土壤速效养分含量较高,有利于下茬作物吸收利用。

表 4 不同肥料处理氮钾肥的利用效率

Table 4 N and K Fertilizer use efficiency of wheat under different fertilizers treatments

| 处理 Treatments | 氮素 Nitrogen | | | 钾素 Potassium | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 吸收量(kg/hm²) Uptake | 利用率(%) Use efficiency | 提高(%) Increase | 吸收量(kg/hm²) Uptake | 利用率(%) Use efficiency | 提高(%) Increase |
| CK | 166.36 | | | 188.07 | | |
| NPK | 209.01 | 18.95 | | 224.83 | 29.53 | |
| $MCRF_1$ | 235.76 | 30.84 | 11.89 | 238.87 | 40.81 | 11.28 |
| $RCRF_1$ | 254.51 | 39.18 | 20.22 | 254.94 | 53.72 | 24.19 |
| $WCRF_1$ | 263.07 | 42.98 | 24.03 | 257.02 | 55.39 | 25.86 |
| $MCRF_2$ | 209.18 | 23.79 | 4.83 | 222.94 | 35.01 | 5.48 |
| $RCRF_2$ | 223.51 | 31.75 | 12.79 | 222.41 | 34.48 | 4.95 |
| $WCRF_2$ | 230.15 | 35.44 | 16.48 | 230.29 | 42.39 | 12.86 |

注:吸收量 = 茎杆干重 × N 含量 + 子粒干重 × N 含量

Note: Uptake amount = dry matter of straw × N concentration in straw + dry matter of grain × N concentration in grain

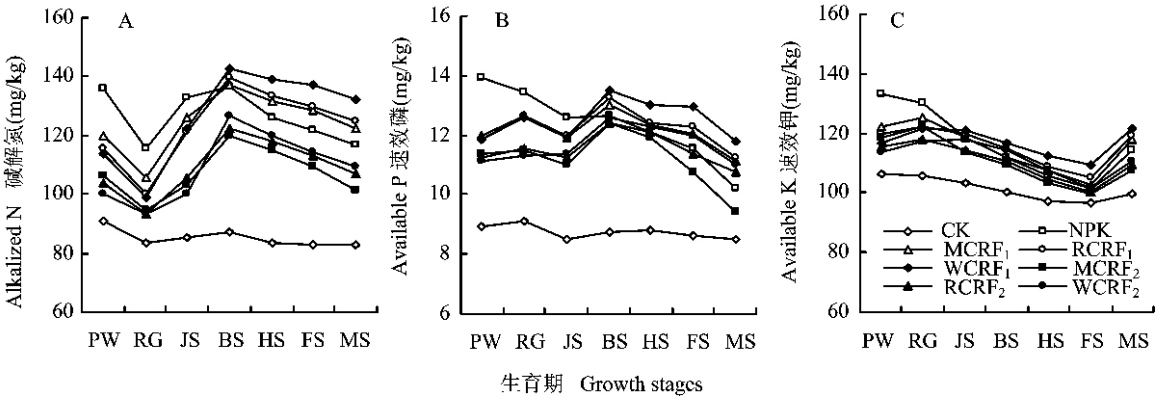


图 2 控释肥对冬小麦各生育期土壤速效养分影响

Fig.2 Effect of CRF on available nutrients of soil at different growth stages of winter wheat

### 2.7 控释肥对土壤酶活性的影响

由表 5 可知,施肥使土壤酶活性均较 CK 处理提高,差异达极显著水平。控释肥处理土壤酶活性高于 NPK 处理。拔节期等量养分条件下,土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性以控释肥 MCRF 最高,其次是 WCFR,而收获期以 WCFR 最高;拔节期和收获期磷酸酶均以 WCFR 活性最高,MCRF 次之。控释肥提高了土壤酶活性,改善土壤养分供应状况,提高肥料的利用率,保护了土壤中微生物正常活动,为冬小麦创造了良好的生长条件。

## 3 讨论与结论

控释肥能调控各养分比例静态平衡和供肥过程动态平衡,可根据作物生长发育期需肥量调节其养分释放速度,肥料利用率高,节肥增产[4, 11-13]。风化煤复合包裹型控释肥富含腐殖质等有机活性物质和丰富的高吸附基团等,养分释放缓急相济,互补长短,与冬小麦需肥规律具有较高的同步性。施用控释肥在冬小麦生长发育前期土壤速效养分含量较 NKP 低,中后期较 NKP 高,满足了冬小麦中后期生长发育的需求,这与王茹芳等结论相同[4]。施用控释肥虽使冬小麦成穗数有所降低,但千粒重、穗粒数和子粒蛋白质含量提高,达到了增产提质效果。控释肥中以 WCRF 效果最好,在等养分条件下,千粒重、穗粒数、子粒蛋白质含量最高,增产效果最好。

冬小麦叶片 Pn、干重、植株全氮 N 全 K 含量及

表 5　不同处理小麦拔节期和收获期土壤中酶活性变化

Table 5　Changes of different treatments on soil enzyme activities at jointing and mature stages of winter wheat

| 处理 Treat. | 脲酶 Urease [$NH_3$-N mg/(g·d)] | | 蔗糖酶 Sucrase [Glu. mg/(g·d)] | | 磷酸酶 Phoshatase [Phenol mg/(g·d)] | | 过氧化氢酶 Hydrogen peroxidase [$KMnO_4$ mL/(g·d)] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | JS | MS | JS | MS | JS | MS | JS | MS |
| CK | 1.95 ± 0.09 fD | 1.53 ± 0.11 hG | 0.45 ± 0.05 dC | 0.49 ± 0.04 eD | 1.95 ± 0.12 fF | 2.05 ± 0.15 dC | 6.97 ± 0.25 eE | 7.35 ± 0.30 eD |
| NPK | 2.69 ± 0.12 eC | 2.43 ± 0.09 gF | 0.54 ± 0.03 cB | 0.64 ± 0.05 dC | 2.26 ± 0.13 eE | 2.30 ± 0.11 cB | 7.69 ± 0.16 dD | 7.99 ± 0.21 dC |
| $MCRF_1$ | 3.26 ± 0.11 aA | 3.05 ± 0.1 bAB | 0.69 ± 0.06 aA | 0.73 ± 0.06 abAB | 2.56 ± 0.09 abAB | 2.76 ± 0.21 abA | 8.64 ± 0.09 aA | 9.26 ± 0.15 aA |
| $RCRFF_1$ | 3.15 ± 0.14 dB | 2.76 ± 0.06 fE | 0.63 ± 0.02 abA | 0.68 ± 0.07 cBC | 2.45 ± 0.16 cdCD | 2.73 ± 0.09 abA | 8.41 ± 0.24 bBC | 9.13 ± 0.13 abAB |
| $WCRFF_1$ | 3.22 ± 0.06 bcAB | 3.11 ± 0.04 aA | 0.66 ± 0.01 abA | 0.75 ± 0.01 aA | 2.59 ± 0.18 aA | 2.79 ± 0.13 aA | 8.53 ± 0.19 abAB | 9.2 ± 0.09 aA |
| $MCRFF_2$ | 3.23 ± 0.07 abAB | 2.99 ± 0.11 cBC | 0.66 ± 0.06 abA | 0.70 ± 0.03 bcAB | 2.50 ± 0.2 bcABC | 2.68 ± 0.15 bA | 8.24 ± 0.23 cC | 8.99 ± 0.05 bcB |
| $RCRFF_2$ | 3.16 ± 0.13 cdB | 2.86 ± 0.15 eD | 0.61 ± 0.01 bAB | 0.64 ± 0.05 dC | 2.39 ± 0.11 dD | 2.68 ± 0.06 bA | 8.23 ± 0.14 cC | 8.92 ± 0.25 cB |
| $WCRFF_2$ | 3.19 ± 0.15 bcdAB | 2.93 ± 0.09 dCD | 0.64 ± 0.1 abA | 0.73 ± 0.07 abAB | 2.46 ± 0.1 cdCD | 2.69 ± 0.16 bA | 8.24 ± 0.06 cC | 8.92 ± 0.16 cB |

运转与养分用量、肥料种类相关，并受土壤养分供应影响[11,14]。本试验结果表明，控释肥促进了冬小麦中后期生长发育，使叶片 Pn、干重、植株全 N 全 K 含量均明显高于 NPK 处理，有利于冬小麦后期干物质积累与转移，提高粒重增产。控释肥中 WCRF 效果最好，这与产量结果一致。

土壤酶活性和微生物是表征土壤肥力的重要指标之一[8,15]。土壤酶活性高低反映了土壤养分转化状况[14]。风化煤复合包裹型控释肥为冬小麦生长发育提供了有机活性物质，为土壤微生物提供了有机能源，改善根际微环境，不同程度激活土壤酶活性，更有利于小麦对土壤养分的吸收与运转，使得肥料利用效率提高。试验表明，80% 养分量控释肥处理土壤速效养分虽与 NPK 处理相近或略低，但产量较 NPK 处理高，可能与此有关，这有待进一步研究。

## 参 考 文 献：


[1] 卢其明，冯新，孙克君，廖宗文. 聚合物/膨润土复合控释材料的应用研究[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11 (2)：183-186.
Lu Q M，Feng X，Sun K J，Liao Z W. Study on the use of polymer/bentonite composites for controlled release [J]. Plant Nutr. Fert. Sci.，2005，11(2)：183-186.

[2] 张海军，武志杰，梁文举，解宏图. 包膜肥料养分控释机理研究进展[J]. 应用生态学报，2003，14(12)：2337-2341.
Zhang H J，Wu Z J，Liang W J，Xie H T. Research advances on controlled release mechanisms of nutrients in coated fertilizers[J]. Chin. J. Appl. Ecol.，2003，14(12)：2337-2341.

[3] Amans E B，G.Slangen J H. The effect of controlled-release fertilizer "Osmocote" on growth，yield and composition of onion plants [J]. Fert. Res.，1994，37(1)：79-84.

[4] 王如芳，张夫道，刘秀梅，等. 胶结型缓释肥在小麦上应用效果研究[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(3)：340-344.
Wang R F，Zhang F D，Liu X M *et al*. Responses of wheat to felted slow-release fertilizer[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.，2005，11(3)：340-344.

[5] 孙克君，卢其明，毛小云，廖宗文. 复合控释材料的控释性、肥效及其成膜特性研究[J]. 土壤学报，2005，42(1)：127-133.
Sun K J，Lu Q M，Mao X Y，Liao Z W. Release-controlled complex material 's capability，fertilizer efficiency and coating characteristics [J]. Acta Pedol. Sin.，2005，42 (1)：127-133.

[6] 刘秀梅，张夫道，冯兆滨，等. 风化煤腐殖酸对氮磷钾的吸附和解析特性[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(5)：641-646.
Liu X M，Zhang F D，Feng Z B *et al*. Adsorption and desorption characteristics of humic acids made from the air slake-coal[J]. Plant Nut. Fert. Sci.，2005，11(5)：641-646.

[7] 贺婧，颜丽，杨凯，等. 不同来源腐植酸的组成和性质研究[J]. 土壤通报，2003，34(4)：343-245.
He J，Yan L，Yang K *et al*. Study on component and character of humic acids from different sources[J]. Chin. J. Soil Sci.，2003，34 (4)：343-245.

[8] 毕军，夏光利，毕研文，等. 腐殖酸生物活性肥料对冬小麦生长及土壤微生物活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11 (1)：99-103.
Bi J，Xia G L，Bi Y W *et al*. Effect of humic bio-active fertilizer on winter wheat and soil microbial activity[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.，2005，11(1)：99-103.

[9] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京：农业出版社，2001.
Lu R K. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing：Agricultural Press，2001.

[10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京农业出版社，1986.
Guan S Y. Research method on soil enzyme[M]. Beijing：Agricutural Press，1986.

[11] 孙克君，毛小云，卢其明，廖宗文. 几种控释氮肥的饲料玉米肥效及其生理效应研究[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11 (3)：345-351.
Sun K J，Mao X Y，Lu Q M，Liao Z W. Effect of several controlled release N fertilizers ( CRNFs) on forage maize and its physiological effects[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.，2005，11(3)：345-351.

[12] Ruter J M. Influence of source，rate，and method of applicating con-

trolled release fertilizer on nutrient and growth of ‘Savannah’ holly [J]. Fert. Res., 1992, 32:101-106.

[13] 武志杰,陈利军. 缓释/控释肥料原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
Wu Z J, Chen L J. Principle and utility of slow/controlled release fertilizer[M]. Beijing:Science Press, 2003.

[14] 同延安,赵营,赵护兵,樊红柱. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1):64-69.
Tong Y A, Zhao Y, Zhao H B, Fan H Z. Effect of N rates on N uptake,transformation and the yield of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(1):64-69.

[15] 李东坡,武志杰,梁成华,等. 缓/控释氮素肥料对土壤生物学活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(3):664-669.
Li D P, Wu Z J, Liang C H *et al*. Effect of slow/controlled release nitrogen fertilizers on soil biological activities[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2006, 25(3):664-669.