猪场废水灌溉对冬小麦耗水和水分利用效率的影响①

王 风[1,2]， 张克强[1]， 黄治平[1]， 杨 鹏[1]

（1 农业部环境保护科研监测所，天津 300191； 2 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心，石家庄 050021）

摘 要： 应用养殖废水进行农田灌溉是解决农业水资源不足的重要途径，特别在水资源严重短缺的华北地区。本文通过田间小区试验应用不同处理阶段的猪场废水稀释（分别应用原水、厌氧水和氧化塘水与清水进行 1∶5 稀释）和厌氧水不同量（830 m^3/hm^2，简称“厌高”；500 m^3/hm^2，简称“厌中”；160 m^3/hm^2，简称“厌低”）灌溉冬小麦，应用中子仪定期监测土壤含水量，结合降水量、灌溉量分析了冬小麦生育期耗水量和水分利用效率。结果表明：返青拔节水后，厌氧水不同量灌溉处理 170 cm 土体贮水量和冬小麦耗水量分别呈现厌中＞厌高＞厌低和厌高＞厌中＞厌低的趋势；不同处理阶段的猪场废水稀释灌溉处理土壤贮水量差别较小，基本稳定在 650～700 mm 之间。厌氧水不同灌溉量处理和不同处理阶段猪场废水稀释灌溉处理水分利用效率分别呈厌中＞厌低＞厌高和厌清1∶5＞塘清1∶5＞原清1∶5＞清水的趋势。耗水量分别与灌溉量、水分利用效率、灌溉水利用效率间达到 5% 显著相关水平。本文建议高效的养殖废水利用效率模式为厌氧水中量灌溉和厌清1∶5、塘清1∶5 稀释灌溉。

关键词： 猪场废水；冬小麦；灌溉；耗水；水分利用效率

中图分类号： S152.7

近年，世界范围展开废水灌溉实践和相关研究，特别在发展中国家。废水灌溉一方面为植物生长提供重要的养分，增加土壤有机质从而提高土壤肥力和生产力水平[1]。另一方面，过量养分、有毒化学物质和病原体同时输入土壤–作物系统，从而降低土壤和作物生产力或品质[2]。规模化猪场大都采用干清粪工艺，不仅大大降低废水中重金属等环境污染物质的含量，同时含有作物需求大量的 N 和 P 营养元素[3-4]，应用猪场废水进行农田灌溉，不仅对水资源进行再生利用，缓解干旱半干旱农区水资源短缺的压力，同时降低农业对化肥的需求[5]。但一体化水肥资源的养殖废水灌溉在补充水分的同时也补充了废料，导致土壤贮水、作物水分利用、水分消耗状况有别于单一的施肥、灌溉过程[6]。本研究开展不同处理阶段猪场废水与地下水稀释以及厌氧水不同量冬小麦灌溉小区试验，监测土壤剖面含水量动态，结合气象资料计算猪场废水不同处理阶段出水稀释灌溉和厌氧水不同灌溉量对土壤贮水量、冬小麦耗水量、水分利用效率等因素的影响，为华北平原制定合理的猪场废水灌溉制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2007 年 9 月底至 2008 年 6 月中旬在天津市西青区杨柳青镇益利来养殖场内进行。该地区气候介于大陆性气候和海洋性气候之间，四季变化明显。年平均气温 11.0～12.5℃，≥0℃生长季始于 3 月上旬，终于 11 月下旬，≥10℃活动积温 4 000 ～ 4 300℃，≥10℃初日在 4 月上旬，终日在 10 月下旬，多年平均降水量 577.8 mm，主要集中在 7—8 月份，10 月份至翌年 6 月份冬小麦生长季节多年平均降水量 107.7 mm[7]。试验期间降水分布如图 1 所示。该区年平均日照时数在 2 610～3 090 h之间，年太阳总辐射在 125～

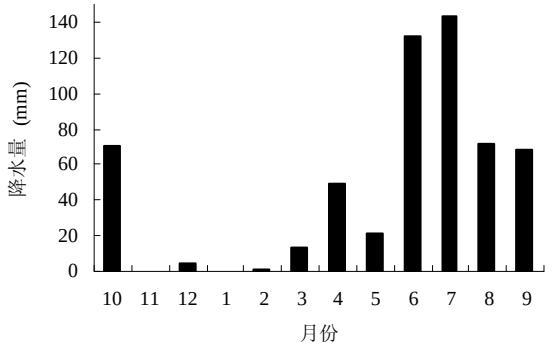

图 1 试验期间降水分布

Fig. 1 Distribution of precipitation during experiment

①基金项目：“十一五”国家科技支撑项目（2006BAD17B02）和中央级公益性科研院所基本科研业务专项（农业部环境保护科研监测所）资助。

作者简介：王风（1982—），男，黑龙江虎林人，研究助理，博士研究生，主要从事废水灌溉研究。E-mail: wangfeng_530@163.com

135 KW/cm^{2}之间，年无霜期约为 180 ~ 190 d。作物种植制度为冬小麦–夏玉米轮作。供试土壤为潮土，耕层体积质量（容重）为 1.39 g/cm^3，砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 622、295 和 83 g/kg，土壤质地为砂壤土（美国制）；耕层基础肥力全N 0.66 g/kg，NH_4^+-N 4.94 mg/kg，NO_3^--N 21.27 mg/kg，全P 0.60 g/kg，速效P 41.05 mg/kg，有机质 11.2 g/kg，土壤pH值为 7.98[3-4]。

试验小区面积 50 m^2（10 m×5 m），供试冬小麦品种为京冬 8 号，2007 年 9 月 29 日播种，行距为 20 cm，2008 年 6 月 18 日收获。试验设 7 个处理，每个处理 3 次重复。小区间用 1 m深防水土工布隔离。冬小麦生育期灌溉 4 次水，分别为越冬水（2007 年 11 月 27 日）、返青拔节水（2008 年 4 月 5 日）、抽雄水（2008 年 5 月 15 日）和灌浆水（2008 年 6 月 4 日），所有处理应用清水（取自 6 m深地下水井，下同）灌溉越冬水，其他生育期分别应用不同处理水进行灌溉，灌水方式为畦灌。灌溉用水分别为原水（猪圈舍干清粪后经冲洗直接流入预处理池的水）、一级处理水（即厌氧水，原水经隔栅进入厌氧池停留 5 天出水）、二级处理水（即仿生态塘水，厌氧水经曝气和浮床植物吸收处理贮存于仿生态塘的水）、清水取自试验区地下 6 m深处的浅层地下水。试验灌溉水质见表 1，所有水质指标浓度虽有较大的范围，但整体随水处理进行浓度逐渐降低，清水因含量极低而忽略不计。

表 1 灌溉水水质

Table 1 Chemical composition in irrigation water

水样	NO_3^--N (mg/L)	NH_4^+-N (mg/L)	TKN (mg/L)	TP (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)
原水	1.97 ~ 3.04	823 ~ 900	323 ~ 2 417	29 ~ 277	760 ~ 7 722	386 ~ 3 306
厌氧水	1.81 ~ 3.21	740 ~ 810	300 ~ 1 447	7 ~ 102	305 ~ 2 266	154 ~ 753
仿生态塘水	1.11 ~ 1.35	62 ~ 685	82 ~ 1 185	3 ~ 92	164 ~ 1 960	28 ~ 624

1.2 试验处理

试验设以下厌氧水节灌处理：处理 1，简称厌高（H_{anae}），厌氧水灌水定额为 830 m^3/hm^2；处理 2，简称厌中（M_{anae}），厌氧水灌水定额为 500 m^3/hm^2；处理 3，简称厌低（L_{anae}），厌氧水灌水定额为 160 m^3/hm^2。试验设以下稀释灌溉处理，灌水定额均为 830 m^3/hm^2：处理 4，简称厌清 1∶5（$T_{anae:gw1:5}$），厌氧水与地下水按 1∶5 比例稀释；处理 5，简称塘清 1∶5（$T_{eco:gw1:5}$），生态塘水与地下水按 1∶5 比例稀释；处理 6，简称清水（T_{gw}），地下水灌溉；处理 7，简称原清 1∶5（$T_{ori:gw1:5}$），原水与地下水按 1∶5 比例稀释。

1.3 样品采集及分析方法

应用 CNC503DR 型中子水分仪每 7 天测定 10、20、30、40、50、70、90、110、130、150、170 cm 土层含水量，中子仪的读数最后矫正成体积含水量。

矫正曲线：

0 ~ 30 cm土层 $V = [0.2741 \times (R/R_0) + 0.1563] \times 100\%$ （1）

30 ~ 170 cm土层 $V = [0.8007 \times (R/R_0) - 0.1361] \times 100\%$ （2）

式中，V为土壤体积含水量（V/V）；R为中子仪实际读数；R_0 为中子仪基本读数 745。

土壤贮水量：

W (mm) = 土壤体积含水量 × 土层厚度(mm) （3）

作物水分利用效率：

WUE (kg/hm^2) = 经济产量/ET （4）

作物生长期间耗水量[8-9]：

ET (mm) = $I + P - \triangle W - R - S_d$ （5）

式中，I 为生育期灌溉量；P 是作物生育期降水量（mm）；$\triangle W$ 是小麦收获期与播种期土壤剖面含水量（mm）之差，R 为径流量（mm），平原地区忽略不计；S_d 为土体下边界净流通量，本文取下边界为 170 mm，可以近似记为 0。

籽粒产量测定：每个小区中选择 3 个代表性样方，每个样方 1 m × 1 m，将地上部生物量全部切下装入样品袋，风干后去壳称量，折算成公顷籽粒产量。

1.4 数据处理

数据处理和图表绘制在Excel2003 下完成，试验结果的差异显著性检验等统计分析在SAS9.0 软件进行[10]。

2 结果与分析

2.1 厌氧水不同灌溉量对土体贮水量的影响

厌氧水不同灌溉量对 0 ~ 170 cm土体贮水量的影响见图 2。从播种到 4 月 5 日，3 个处理之间贮水量差异不明显，大体在 650 ~ 700 mm之间。灌溉返青拔节水后，不同处理间土壤贮水量差异逐渐明显，整体呈

现厌中＞厌高＞厌低处理的趋势。特别是较高灌溉量的厌高和厌中处理均在灌后土体贮水量呈现小幅的增加，且在收获后土体贮水量与播种前相当。而厌低处理因灌溉量较低，整个生育期土体贮水量呈降低趋势，收获时土体贮水量比初始减少 70 mm，并且微量的灌溉对土体贮水量的补给能力有限，但在 4 月 24 日土体贮水量峰值是因为 4 月 21—22 日连续降水 43.2 mm所致。

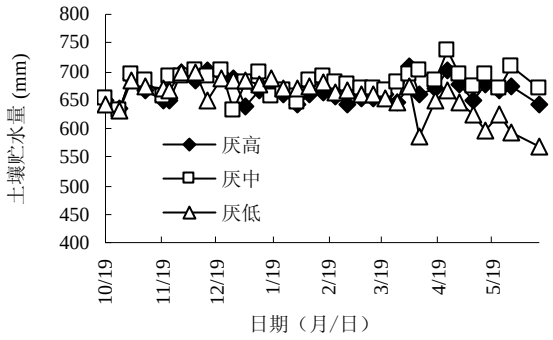

图 2　厌氧水不同灌溉量土壤贮水量动态

Fig. 2　Soil water storages under different irrigation amounts of anaerobic wastewater

2.2　不同处理阶段出水稀释灌溉对土体贮水量的影响

不同处理阶段出水稀释灌溉对 0 ~ 170 cm 土体贮水量的影响见图 3。与不同厌氧水灌溉土壤贮水量情况不同的是不同处理阶段出水稀释灌溉在整个冬小麦生长季变化不明显，而且土壤贮水量变化趋势一致。4 个处理土壤贮水量的平均值（图 3 中加粗曲线）基本稳定在 650 ~ 700 mm 之间，并没有明显的水分盈亏，说明 332 mm 的灌溉量能够满足冬小麦水分需求，并为下季夏玉米的生长提供较好的土壤墒情。此外，土壤贮水量的调控主要取决于灌溉、降水和作物消耗，图 3 中虚箭头和实箭头分别表示因密集降水和灌溉引起土体贮水量显著增加的过程。

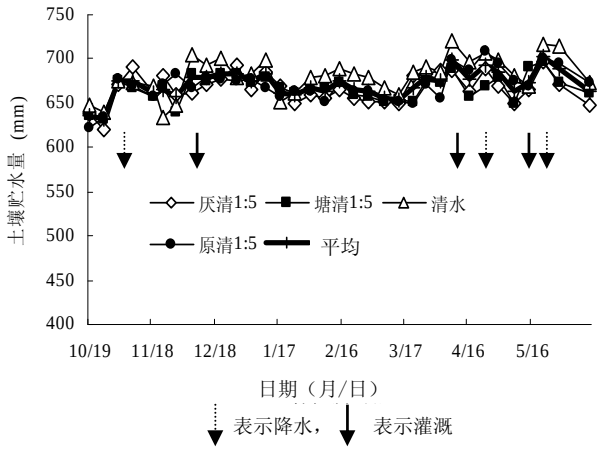

图 3　不同处理阶段出水稀释灌溉土壤贮水量动态

Fig. 3　Soil water storages under dilute irrigation of swine wastewater

2.3　猪场废水灌溉对冬小麦耗水量的影响

厌氧水不同灌溉量对冬小麦耗水量的影响见表 2。在相同降水量条件下，厌高处理虽然有最大的灌溉量，但季末土壤贮水量仍然比初始少 7.14 mm；厌低处理季末土壤贮水量比初始少 73.2 mm，说明灌溉和降水不能满足小麦生长需求。厌氧水不同灌溉量处理耗水量随灌溉量增大而增加，厌高和厌中处理分别比厌低处理增加了 66.26% 和 14.70%。

不同处理阶段出水稀释灌溉对冬小麦耗水量影响见表 2。在降水和灌溉量相同条件下，土壤耗水量主要决定于土壤贮水量的变化。厌清 1∶5、塘清 1∶5 处理和清水处理有较大耗水量，分别比原清 1∶5 处理增加 9.12%、6.03% 和 5.74%。

表 2　猪场废水灌溉条件下的冬小麦耗水量

Table 2　Soil water consumptions under irrigation of swine wastewater

处理	初始贮水量(mm)	季末贮水量(mm)	△*S* (mm)	*I* (mm)	*ET* (mm)
厌高	648.61	641.47	-7.14	332	506.75
厌中	651.14	669.15	18.01	200	349.59
厌低	643.31	570.11	-73.2	64	304.8
厌清 1:5	637.49	647.85	10.37	332	489.23
塘清 1:5	636.93	661.16	24.23	332	475.37
清水	647.91	673.45	25.54	332	474.06
原清 1:5	622.46	673.75	51.29	332	448.31

注：作物生育期间降水量为 167.6 mm。

2.4　猪场废水灌溉对冬小麦水分利用效率的影响

厌氧水不同灌溉量对冬小麦水分利用效率的影响见表 3。冬小麦籽粒产量呈厌中＞厌高＞厌低处理的趋势；水分利用效率呈厌中＞厌低＞厌高处理的趋势，厌中和厌低处理分别比厌高处理增加 59.75% 和 57.79%，与厌高处理差异均达到 5% 显著水平；灌溉水利用效率呈厌低＞厌中＞厌高处理的趋势，三者间差异均达到 5% 显著水平，厌低和厌中处理分别比厌高处理增加 394% 和 82.83%。不同处理阶段出水稀释灌溉对冬小麦水分利用效率的影响见表 3。籽粒产量、水分利用效率和灌溉水利用效率整体呈厌清 1∶5＞塘清 1∶5＞原清 1∶5＞清水处理的趋势，各处理与清水处理间差异均达到 5% 显著水平。

另外，所有处理耗水量和灌溉量之间达到显著相关（$y = 0.705\,2x + 242.8$ $R^2 = 0.910\,2^{**}$ $n = 7$），耗水量和水分利用效率之间达到显著负相关（$y = -20.11x + 738.73$ $R^2 = 0.764\,1^{*}$ $n = 7$），耗水量和灌溉水利用效率之间达到显著负相关（$y = -2.448\,6x + 515.41$ $R^2 = 0.733\,9^{*}$ $n = 7$）。

表 3 猪场废水灌溉条件下的冬小麦水分利用效率

Table 3 Water use efficiency of winter wheat under irrigation of swine wastewater

处理	籽粒产量 (kg/hm^2)	*WUE* ($kg/(hm^2 \cdot mm)$)	灌溉水利用效率 ($kg/(hm^2 \cdot mm)$)
厌高	6 220.16	12.27 b	18.74 c
厌中	6 852.43	19.60 a	34.26 b
厌低	5 901.36	19.36 a	92.21 a
厌清 1:5	6 915.19	14.13 a	20.83 a
塘清 1:5	6 720.52	14.14 a	20.24 a
清水	4 970.65	10.49 b	14.97 b
原清 1:5	6 042.43	13.48 a	18.20 a

注：同一列中字母不同表示在 $p<0.05$ 水平上的差异显著。

3 讨论

通常认为华北平原冬小麦生育期耗水量约为 450 mm 左右[11-12]。本试验条件下厌高处理因较高的灌溉量而输入过量的有效态 N 素，促进了冬小麦植株的生长并贪青晚熟，促进了水分的消耗；厌低处理因灌溉量少而输入的养分有限，小麦通过蒸腾作用耗散的水分也较少。郭家选等[13]在华北平原试验也发现冬小麦相对蒸散强度与土壤相对湿度呈正相关，中科院栾城试验站的试验表明农田总蒸散量与灌水量密切相关，随农田耗水量和灌水量的增加，农田总蒸散量也显著增加[14]。虽然稀释灌溉各处理灌溉定额相同，但因灌溉携带进入土壤系统中的养分数量和形态差异，也造成了冬小麦不同的耗水量。清水处理虽然作物植株矮小，叶面积指数较低，但较高的土壤含水量造成较大的土壤蒸发量[15-17]；原清 1∶5 处理可能通过输入猪场原水中较多的固体悬浮物质在土壤表层形成的结壳而抑制土表蒸发[18-19]。

厌低处理水分利用效率较高，主要因为灌浆期适度水分胁迫有利于提高水分利用效率，严重水分胁迫使水分利用效率和产量均降低[20-21]。一些生态系统水平上的研究也证实，当遭受中度干旱时，冠层导度下降，生态系统水分利用效率升高[22]。虽然稀释灌溉各处理灌溉定额相同，但是因为养分缺失严重抑制了清水处理水分利用效率和灌溉水利用效率，这个结论也被普遍接受。而养分形态和数量的差异造成作物可吸收利用的有效态养分的差异，原清 1∶5 处理虽然有较高的养分含量，但绝大多数以作物难以吸收的有机态形式存在，有机态养分经过矿化转变成有效态养分需要一段时间，造成土壤养分供给与作物需求之间的矛盾，通过减少产量而降低水分利用效率[6]。

参考文献：

[1] Munir J, Mohammad R, Sami H, Laith R. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. Desalination, 2007, 215(1/3): 143−152

[2] Vazquezmontiel O, Horan NJ, Mara DD. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation. Water Science and Technology, 1996, 33(10/11): 355−362

[3] 王风, 张克强, 黄治平, 杨鹏, 杨军, 于丹, 李晓光. 养殖废水灌溉对冬小麦光合特性和产量的影响. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 16−19

[4] 王风, 黄治平, 张克强, 杨军, 张金凤, 李晓光, 于丹. 猪场废水灌溉对土壤酶活的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1 602−1 606

[5] Rahil MH, Antonopoulos VZ. Simulating soil water flow and nitrogen dynamics in a sunflower field irrigated with reclaimed wastewater. Agricultural Water Management, 2007, 92(3): 142−150

[6] 杨军, 张蕾, 张克强, 王风, 黄治平, 李晓光. 猪场废水灌溉对潮土硝态氮含量变化的影响. 农业工程学报, 2009, 25(5): 35−39

[7] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响. 水利学报, 2004 (2): 77−87

[8] 刘志娟, 杨晓光, 薛昌颖, 张秋平, Bouman BAM, 王化琪. 华北地区旱稻产量适应性及耗水特征分析. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1 143−1 148

[9] 高丽娜, 陈素英, 张喜英, 孙宏勇, 王彦梅, 邵立威. 华北平原冬小麦麦田覆盖对土壤温度和生育进程的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 107−113

[10] SAS Institute. SAS/STAT User's Guide. Ver. 9.0. 4th ed. Cary, NC: SAS Institute, 1989

[11] 任鸿瑞, 罗毅. 鲁西北平原冬小麦和夏玉米耗水量的实验研究. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 37−39

[12] 刘恩民, 张代桥, 刘万章. 鲁西北平原农田耗水规律与测定方法比较. 水科学进展, 2009, 20(2): 190−196

[13] 郭家选, 李玉中, 严昌荣, 赵全胜, 梅旭荣. 华北平原冬小麦农田蒸散量. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2 357−2 362

[14] 郭长城, 刘孟雨, 陈素英, 张喜英. 太行山山前平原农田耗水影响因素与水分利用效率提高的途径. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 55−58

[15] Ferretti DF, Pendall E, Morgan JA, LeCain D, Mosier AR. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO_2. Plant and Soil, 2003, 254(2): 291−303

[16] Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapo-

transpiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment mode1. Agricultural Water Management, 2004, 65(3): 173−191

[17] Lauenroth WK, Bradford JB. Ecohydrology and the partitioning AET between transpiration and evaporation in a semiarid steppe. Ecosystems, 2006, 9(5): 756−767

[18] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯. 聚丙硒酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究Ⅱ. 侵蚀. 土壤学报, 2003, 40(2): 401−406

[19] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究I. 入渗. 土壤学报, 2003, 40(2): 178−195

[20] 盛钰, 赵成义, 贾宏涛. 水分胁迫对冬小麦光合及生物学特性的影响. 水土保持学报, 2006, 20(1): 193−196

[21] 张建军, 唐小明, 党翼. 灌水量及其分配方式对冬小麦水分利用效率、光合特性和产量的影响. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 85−90

[22] Yu GR, Song X, Wang QF, Liu YF, Guan DX, Yan JH, Sun XM, Zhang LM, Wen XF. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. New Phytologist, 2007, 177(4): 927−937

Water Consumption and Use Efficiency of Winter Wheat with Swine Wastewater Irrigation

WANG Feng[1, 2], ZHANG Ke-qiang[1], HUANG Zhi-ping[1], YANG Peng[1]

(1 *Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin* 300191, *China*;

2 *Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang* 050021, *China*)

Abstract: Livestock wastewater irrigation is an important way to alleviate the problem of water shortage, especially in North China Plain. In this paper different treating stages of swine wastewater were used for wheat irrigation by the field experiment method. Soil water contents were monitored in each week. Water consumption and use efficiency (WUE) were analyzed with the precipitation and irrigation amount. The results showed that: Soil water storages and consumptions under different anaerobic quotas were in order of M_{anae}>H_{anae}>L_{anae} and H_{anae}>M_{anae}>L_{anae}, respectively. Soil water storages of different treating stages of swine wastewater irrigation were insignificant, and stable in range of 650 mm to 700 mm. WUE of different treatments followed by M_{anae}>L_{anae}>H_{anae} and $T_{anae:gw1:5}$>$T_{eco:gw1:5}$ >$T_{ori:gw1:5}$>CK. Water consumption had significant correlations with irrigation quota, WUE and irrigation efficiency, respectively. M_{anae}, $T_{anae:gw1:5}$ and $T_{eco:gw1:5}$ were recommended as high WUE patterns of swine wastewater.

Key words: Swine wastewater, Wheat, Irrigation, Water consumption, Water use efficiency