

2 结果与分析

2.1 PWM 占空比对离心喷头转速的影响

离心喷头转速和 PWM 占空比的对应关系如图 3 所示。电压为 48 V、PWM 频率为 500 Hz 时，离心喷头转速和 PWM 占空比呈线性关系，利用 PWM 信号发生器调节 PWM 占空比，可以较好地控制离心喷头的转速。

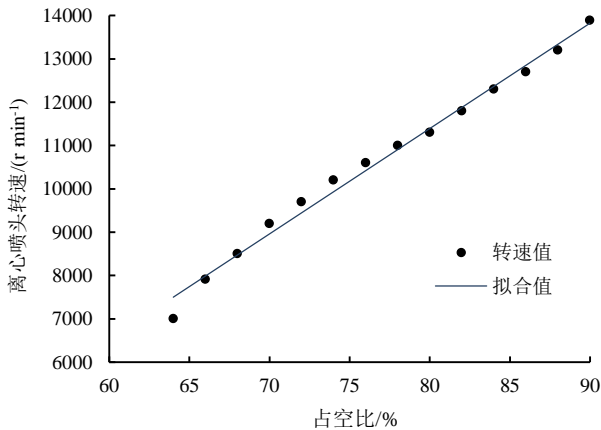


图 3 离心喷头转速和 PWM 占空比之间的关系

Fig.3 Relationship between centrifugal nozzle speed and PWM duty cycle

2.2 离心喷头转速对雾滴粒径的影响

雾滴粒径采集结束后，使用扫描仪将 WSP 扫描成电子图像。流量为 1.5 L/min 时，离心喷头不同转速下的雾化效果如图 4 所示，WSP 从左到右对应的离心喷头转速为从低到高。

图 4 水敏纸采样扫描结果

Fig.4 Scanning image of water sensitive paper sampling results

对图像进行批量处理及分析，可以得到每一张 WSP 上的雾滴粒径和数量分布，取样雾滴的体积按雾滴大小顺序进行累积，其累积值为取样雾滴体积总和的 50% 所对应的雾滴直径，被称为体积中值直径 (VMD); 取样雾滴的个数按雾滴大小顺序进行累积，其累积值为取样雾滴个数总和的 50% 所对应的雾滴直径，被称为数量中值直径 (NMD)。不同转速下的 VMD 和 NMD 如图 5 所示。

离心喷头转速在 8 000、9 000、10 000、11 000、12 000、13 000 r/min 时，喷头下方 1 m、喷施半径 0.8 m 处的雾滴体积中值直径分别为 226.5、210.7、208.8、

162.9、154.2、142.9 μm ，数量中值直径分别为 217.0、165.7、143.0、116.0、109.0、93.3 μm ，雾滴谱宽度分别为 1.04、1.27、1.46、1.4、1.41、1.53。相同流量下，离心喷头转速越大，雾滴的体积中值直径越小，数量中值直径越小，雾滴谱宽度呈增大趋势，喷头的雾化效果越好。这主要是因为离心喷头是通过雾化盘高速旋转产生离心力将药液雾化，当喷头的转速较低时，药液的黏度和表面张力是影响雾化效果的主要因素，此时雾滴数量较少、粒径较大；当喷头的转速变高时，药液被拉成许多丝状射流，在内雾化盘不远处就迅速断裂，变成无数液滴，随后打到外雾化盘尼龙螺丝上进一步雾化^[10]。

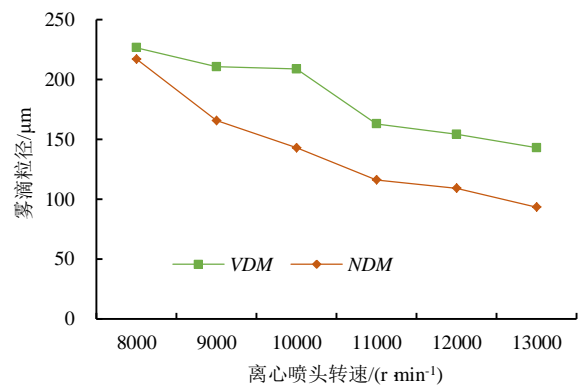


图 5 不同转速下的雾滴粒径

Fig.5 Droplet diameter at different speeds

2.3 离心喷头转速对静态雾滴沉积分布的影响

在流量为 1.5 L/min、转速为 10 000 r/min 的工况下，离心喷头静态雾滴沉积分布如图 6 所示。雾滴主要分布在喷施半径 0.5~1 m 之间；相同喷施半径上的雾滴分布并不均匀。进一步选取喷施半径为 0.5 m 圆环区域和雾滴分布中心剖切面进行分析。

图 6 离心喷头静态雾滴沉积分布

Fig.6 Static droplet deposition distribution diagram of centrifugal nozzle

在喷施半径为 0.5 m 的圆环区域上，从喷头进水管位置为 0° 的顺时针方向旋转，每 30° 选取 1 个雾滴沉积量，如表 1 和图 7 所示。分析离心喷头流量为 1.5 L/min，转速为 8 000、9 000、10 000、11 000、12 000、

13 000 r/min时，喷施半径为0.5 m圆环区域上的雾滴沉积状况^[15]。首先，随着喷头转速的增加，喷施半径为0.5 m圆环区域上雾滴沉积量越来越少；其次，相同喷施半径下不同角度雾滴沉积量不同，尤其是当喷头转速较低时，差异更加明显。相同喷施半径雾滴沉积量不同对施药均匀性造成显著影响，造成这种现象的原因主要是由于离心喷头采用单一管路进液，当药液流到雾化盘上时，离心力作用下将药液不断地甩出，雾化盘顺时针旋转，随着旋转角度的增加，雾化盘内的液体不断减少，造成相同喷施半径雾滴沉积量不同；随着喷头转速的增加，喷施半径逐渐增大，同一喷施半径的沉积量也会减少^[16-17]。

表 1 静态雾滴分布的中心剖面模型系数

Table 1 Model coefficients of static fog distribution on the central section plane

顺时针旋转角度/(°)	离心喷头转速/(r min ⁻¹)					
	8 000	9 000	10 000	11 000	12 000	13 000
30	24	20.3	16.3	14.9	10.3	10
60	22	20.9	16.3	13.6	10.4	9.2
90	16	19	16.5	13.9	10.9	9.3
120	16.4	15.9	14.5	13.2	10	7.8
150	22.4	17	16	15.9	10.7	7.7
180	28.3	24.8	22.6	20.3	14	10.9
210	25.6	21.3	21.3	17.3	13.5	10.2
240	20	18.5	19.5	15.4	14.6	12.4
270	22.4	18.4	20.2	14.5	15.1	13
300	32.9	24.9	21.7	15.5	14.9	14.1
330	37.3	26.9	21.1	16.3	14.4	13.5
360	30.3	23.9	20.1	17.5	12.7	11.9

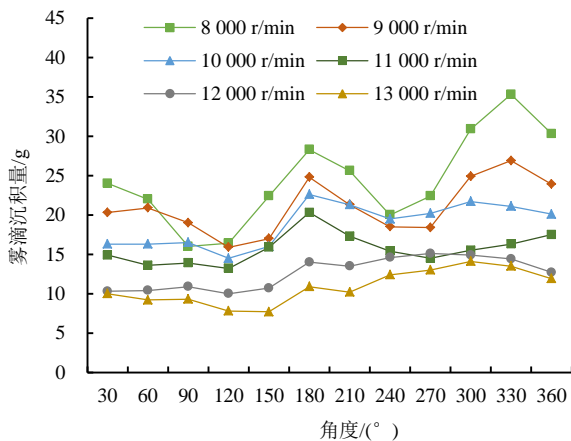


图 7 不同转速下的喷施半径为 0.5 m 圆环区域上的沉积分布

Fig.7 Deposition distribution in 0.5 m ring area with spraying radius at different rotational speeds

离心喷头进水管位置为0°，顺时针方向旋转90°方向上的静态雾滴分布中心剖切面的雾滴沉积量如表2所示，分布如图8所示。分析离心喷头流量为1.5 L/min，转速为8 000、9 000、10 000、11 000、12 000、

13 000 r/min时，静态雾滴分布中心剖切面上的雾滴沉积分布状况。

表 2 静态雾滴分布的中心剖面雾滴值

Table 2 Model coefficients of static fog distribution on the central section plane

据喷头中心点距离/m	离心喷头转速/(r min ⁻¹)					
	8 000	9 000	10 000	11 000	12 000	13 000
-1.6	3.65	4	2.6	0.9	0.15	0.2
-1.4	7.2	4.95	2.55	1.3	0.6	0.05
-1.2	13.55	7.9	3.45	2.9	1.85	1.35
-1	29.65	20.75	11.45	8.6	5.45	4.05
-0.8	26.25	23.35	20.55	13.35	9.1	8.1
-0.6	14.15	16.3	17.45	13.75	11.6	11
-0.4	10.15	10.5	10.7	10.75	9.8	9.85
-0.2	10.85	9.9	8.65	9.85	9.45	7.7
0	11.1	11.35	8.6	10.45	8.85	8.15
0.2	14.1	14	10.5	11.85	10.25	9.25
0.4	21.2	20.05	14.7	14.15	11.55	10.95
0.6	24.95	18.9	19.75	17.3	14.7	13.2
0.8	8.85	9.5	17.65	18.15	18.5	15.7
1	4.85	3.6	8.95	11.65	16.1	16.45
1.2	4.5	4.65	4.35	5.6	8.35	11.65
1.4	2.5	8.35	6.1	3.85	4.15	5.5
1.6	0.4	4.15	8.1	5.05	3.05	3.25

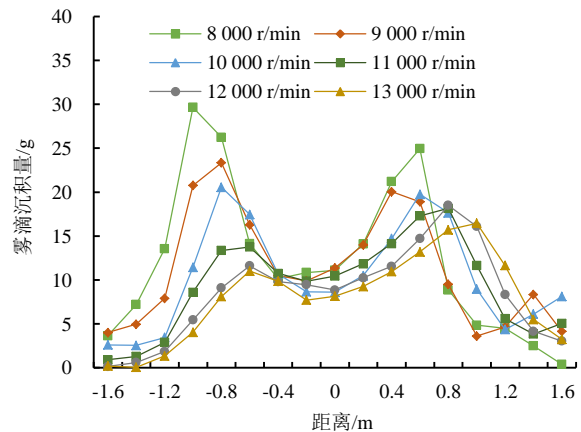


图 8 不同转速下的静态雾滴分布中心剖面沉积分布状况

Fig.8 Deposition and distribution on section surface of static fog droplet distribution center at different rotational speeds

离心喷头静态雾滴分布中心剖面呈双峰分布，由 MATLAB 软件处理得到的回归模型可用式 (1) 表示：

$$G = a_1 e^{-((r+b_1)/c_1)^2} + a_2 e^{-((r-b_2)/c_2)^2}, \quad (1)$$

式中： r 为目标航空杯到雾滴分布中心的距离 (m)； a_1 、 a_2 分别为沉积分布左右侧峰值 (g)； b_1 、 b_2 分别为沉积分布左右侧峰值坐标 (m)； c_1 、 c_2 为待定系数。

不同转速下各系数的拟合结果及模型决定系数如表 3 所示， a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 的变化趋势如图 9—图 10 所

示。离心喷头流量为 1.5 L/min 时, 随着喷头转速的增加, 雾滴沉积分布中心剖切面左侧峰值呈下降趋势, 左侧峰值位置向雾滴分布中心方向移动; 右侧峰值基本不变, 右侧峰值位置向远离雾滴分布中心方向移动。当喷头转速较低时, 雾滴沉积分布中心剖切面左侧峰

值高于右侧峰值; 当喷头转速较低时, 雾滴沉积分布中心剖切面左侧峰值低于右侧峰值。这是由于喷头转速的增加, 雾滴粒径变小, 导致雾滴的运动轨迹发生了变化。

表 3 静态雾滴分布的中心剖切面模型系数

Table 3 Model coefficients of static fog distribution on the central section plane

喷头转速/(r min ⁻¹)	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2	$R^2/\%$
8 000	28.14	21.16	-0.905 2	0.422 9	0.41	0.54	89.68
9 000	22.7	17.66	-0.846 9	0.405 4	0.40	0.65	81.96
10 000	19.66	16.85	-0.736 6	0.595 1	0.37	0.7	83.28
11 000	13.51	17.15	-0.663 2	0.612 3	0.67	0.48	93.95
12 000	11.15	17.45	-0.464 3	0.787 4	0.53	0.62	96.76
13 000	10.41	16.18	-0.498 4	0.819 1	0.63	0.54	97.10

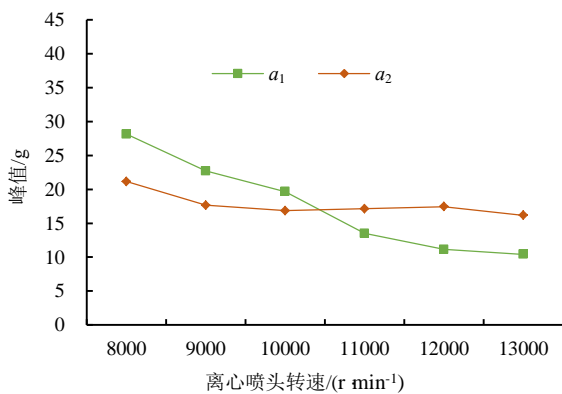


图 9 不同转速下雾滴分布中心剖切面峰值

Fig.9 The peak value of section surface of droplet distribution center at different rotational speeds

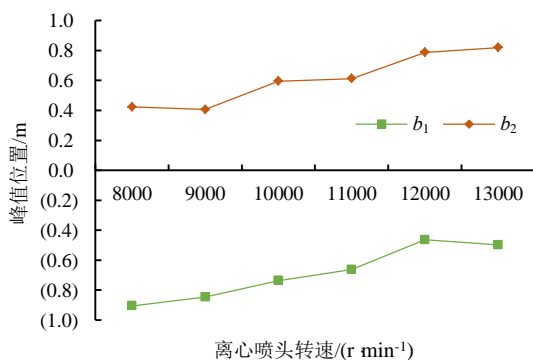


图 10 不同转速下雾滴分布中心剖切面峰值位置

Fig.10 Peak position of section surface of fog droplet distribution center at different rotational speeds

3 讨论

雾滴粒径大小和雾滴沉积分布均匀性对农药的药效具有显著的影响。液力式喷头通过控制压力来改变雾滴粒径大小, 在雾滴粒径变化的同时, 喷头流量也发生改变, 而离心喷头是在流量一定的情况下通过控制转速来改变雾滴粒径大小, 相比液力式喷头控制更加简单、雾化效果更好。研究表明, 提高离心喷头

的转速可以显著降低雾滴粒径大小, 雾滴粒径与雾滴覆盖密度、喷头流量具有十分密切的关系。1 个粒径为 300 μm 的粗大雾滴变为 150 μm 的中等雾滴后, 就变为了 4 个雾滴, 而粒径缩小到 50 μm 后, 则会变为 36 个细小雾滴。由此可见, 随着雾滴粒径的缩小, 雾滴数呈几何级速度增加, 而随着雾滴数量的增加, 农药击中靶标的概率会显著增加, 覆盖度也会更加均匀^[18]。农药在喷施过程中的雾滴粒径大小也不相同, 雾滴粒径与农药的药效之间存在生物最佳粒径的关系。农药喷雾技术理论研究认为, 防治飞行的害虫适合采用 10~50 μm 的细小雾滴, 防治作物叶面爬行类害虫幼虫和喷洒杀菌剂防治植物病害则适合采用 30~150 μm 的雾滴。喷洒除草剂时, 适合采用 100~300 μm 的较大粒径的雾滴^[19-20]。合理地控制雾滴粒径大小, 提高雾滴沉积分布均匀性是使用少量的农药取得较好的防治效果并减少环境污染的关键。

离心雾化技术是当前公认的产生雾滴较小、均匀性较高、雾滴谱范围较窄的先进雾化技术。以离心雾化为核心技术的可控雾滴施药装备, 可通过离心喷头的转速变化来控制雾滴直径, 以满足不同作业对象及气象条件对雾滴的要求, 在提高农药雾滴在靶标作物上的附着率及分布均匀性的同时, 减少无效雾滴数量, 从而达到提高农药有效利用率和减少农药污染的目的^[10]。目前, 离心喷头主要用于植保无人机上, 价格高是影响离心喷头大范围推广的主要因素, 降低离心喷头生产成本, 研究在低转速工况条件下实现较好的雾化效果以及减少雾滴漂移损失是离心喷头未来的发展方向。

4 结论

1) 离心喷头转速和 PWM 占空比呈线性关系, 通过调节 PWM 占空比, 可以有效地控制离心喷头转速, 进而控制雾滴粒径大小, 实现对农作物病虫害

的精准防控。

2) 相同流量条件下, 离心喷头转速越大, 雾滴的体积中值直径越小, 数量中值直径越小, 雾滴谱宽度呈增大趋势, 喷头的雾化效果越好。

3) 离心喷头在相同喷施半径上的雾滴沉积分布不均匀; 随着喷头转速的增加, 雾滴沉积分布中心剖面左侧峰值呈下降趋势, 左侧峰值位置向雾滴分布中心方向移动; 右侧峰值基本不变, 右侧峰值位置向远离雾滴分布中心方向移动。

参考文献:

- [1] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 389-397.
HE Xiongkui. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: A review[J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 389-397.
- [2] 杨风波, 薛新宇, 蔡晨, 等. 航空专用离心喷头雾化性能试验与影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 96-104.
YANG Fengbo, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Atomization performance test and influence factors of aviation special centrifugal nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 96-104.
- [3] 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72.
- [4] FORD M G, SALT D W. Behavior of insecticide deposits and their transfer from plant to insect surface[J]. Pesticides on Plant Surfaces, 1987, 12(6): 5-8.
- [5] WASHINGTON J R. Relationship between the spray droplet density of two protectant fungicides and the germination of mycosphaerella fijiensis ascospores on banana leaf surfaces[J]. Pesticide Science, 1997, 50(3): 233-239.
- [6] 王玲, 兰玉彬, WCLINT Hoffmann, 等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 15-22.
WANG Ling, LAN Yubin, WCLINT Hoffmann, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 15-22.
- [7] 赵铖, 何雄奎, 曾爱军, 等. 离心雾化低容量喷杆喷雾与常量喷雾对比研究[J]. 农药学报, 2020, 22(5): 884-891.
ZHAO Cheng, HE Xiongkui, ZENG Aijun, et al. Comparative research on centrifugal-low volume spray and conventional spray in fields[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22(5): 884-891.
- [8] 周瑞琼, 张慧春, 周宏平, 等. 喷雾参数间互作效应对农药雾滴飘移的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(7): 612-617, 638.
ZHOU Ruiqiong, ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, et al. Interaction effects of spray parameters on pesticide spray droplet drift[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(7): 612-617, 638.
- [9] 魏新华, 蒋杉, 张进敏, 等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 87-92, 86.
WEI Xinhua, JIANG Shan, ZHANG Jinmin, et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 87-92, 86.
- [10] 刘德江, 龚艳, 王果, 等. 离心雾化技术在植保机械领域的发展研究[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(12): 58-61.
LIU Dejiang, GONG Yan, WANG Guo, et al. Development of centrifugal atomization technology in plant protection machinery[J]. China Plant Protection, 2016, 36(12): 58-61.
- [11] 王晓文, 袁寿其, 贾卫东. 丘陵山区农业机械化现状与发展[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(5): 535-540.
WANG Xiaowen, YUAN Shouqi, JIA Weidong. Current situation and development of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(5): 535-540.
- [12] 彭柳忠. 一种安装在飞机上的果树喷洒雾化喷头[P]. 中国: CN211129533U, 2020-07-31.
PENG Liuzhong. The utility model relates to a fruit tree atomizing nozzle installed on an airplane[P]. China: CN211129533U, 2020-07-31.
- [13] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105-113.
CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105-113.
- [14] 高飞, 朱德兰, 闫婧歆, 等. 安装高度和工作压力对育苗喷头水力性能影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 119-125.
GAO Fei, ZHU Delan, YAN Jingxin, et al. Impact of mounting height and working water pressure on the performance of micro-sprinkler irrigation system for seedling beds[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 119-125.
- [15] 史永杰, 朱兴业, 胡广, 等. 不同工况对喷灌水量分布的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(3): 318-324.
SHI Yongjie, ZHU Xingye, HU Guang, et al. Effect of different working conditions on water for sprinkler irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(3): 318-324.
- [16] 漆海霞, 周靖康, 李承杰, 等. 基于网络 RTK 的离心式无人机变量施药可行性初探[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 81-89.
QI Haixia, ZHOU Jingkang, LI Chengjie, et al. Feasibility of variable rate spraying of centrifugal UAV using network RTK[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 81-89.
- [17] 贾卫东, 胡化超, 陈龙, 等. 风幕式静电喷杆喷雾喷头雾化与雾滴沉积性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 53-59.
JIA Weidong, HU Huachao, CHEN Long, et al. Performance experiment on spray atomization and droplets deposition of win-curtain electrostatic boom spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 53-59.
- [18] 马杨. 基于 PWM 间歇式调压控流喷雾的沉积率试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
MA Yang. Experimental study on deposition rate of PWM based pluse intermittent spray under pressure regulation and flow control[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [19] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 9-16.
YUAN Huizhu, WANG Guobin. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. Plant Protection, 2015, 41(6): 9-16.
- [20] 邹雄, 徐让书, 李景春, 等. 植保无人机喷洒作业雾滴飘移的质点运动学分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(11): 1 177-1 181, 1 188.
ZOU Xiong, XU Rangshu, LI Jingchun, et al. Particle kinematics analysis of droplet drift in plant protection UAV spraying operation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(11): 1 177-1 181, 1 188.

(下转第 111 页)